

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE PSICOLOGÍA

**Departamento de Personalidad, Evaluación y Tratamiento Psicológico II
(Psicología Diferencial y del Trabajo)**



TESIS DOCTORAL

**Evaluación de herramientas de simulación y estudio de las preferencias
del color en daltónicos dicrómatas**

**Assessment of colour simulation tools and study of colour preference in
red-green dichromats**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Leticia Álvaro Llorente

Directores

Julio Lillo Jover

Humberto Moreira Villega

Madrid, 2016

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

Facultad de Psicología

Departamento de Personalidad, Evaluación y Tratamiento

Psicológico II (Psicología Diferencial y del Trabajo)

TESIS DOCTORAL



***Evaluación de Herramientas de Simulación y
Estudio de las Preferencias del Color en Daltónicos
Dicrómatas***

***Assessment of Colour Simulation Tools and Study of
Colour Preference in Red-Green Dichromats***

AUTORA

Leticia Álvaro Llorente

DIRECTORES

Julio Lillo Jover – Catedrático de Ergonomía

Humberto Moreira Villegas – Doctor en Psicología

Madrid, 2015

Facultad de Psicología

Departamento de Personalidad, Evaluación y Tratamiento
Psicológico II (Psicología Diferencial y del Trabajo)

Evaluación de Herramientas de Simulación y Estudio de las Preferencias del Color en Daltónicos Dicrómatas

Assessment of Colour Simulation Tools and Study of Colour Preference in Red-Green Dichromats

Memoria presentada por

Leticia Álvaro Llorente

para la obtención del grado de Doctor

VºBº Directores:

Julio Lillo Jover

Humberto Moreira Villegas

D. JULIO ANTONIO LILLO JOVER, Catedrático de Ergonomía del Departamento de Personalidad, Evaluación y Tratamiento Psicológico II (Psicología Diferencial y del Trabajo),

D. HUMBERTO MOREIRA VILLEGAS, Profesor Asociado del Departamento de Personalidad, Evaluación y Tratamiento Psicológico II (Psicología Diferencial y del Trabajo),

CERTIFICAN:

Que Dña. Leticia Álvaro Llorente ha realizado bajo su dirección los trabajos de investigación correspondientes a su Tesis Doctoral titulada: “EVALUACIÓN DE HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN Y ESTUDIO DE LAS PREFERENCIAS DEL COLOR EN DALTÓNICOS DICRÓMATAS - ASSESSMENT OF COLOUR SIMULATION TOOLS AND STUDY OF COLOUR PREFERENCE IN RED-GREEN DICHROMATS”, que ha terminado con el mayor aprovechamiento y se encuentra en condiciones para ser defendida ante un Tribunal. Para que así conste, firmamos el presente certificado en Madrid, a 5 de Octubre de 2015.

Fdo. Julio Lillo Jover

Fdo. Humberto Moreira Villegas

If I have seen further it is by standing on the shoulders of giants (Isaac Newton)

A mi madre, porque yo no estaría escribiendo esta tesis si no fuera por ella

Agradecimientos

Cualquier persona que se haya enfrentado a una tarea como la de elaborar una tesis doctoral sabe que esta empresa no hubiera sido posible sin la colaboración de muchas personas, “gigantes” en palabras de Newton, tanto en el plano profesional como en el personal.

En primer lugar quiero agradecer su labor a mis directores, Julio y Humberto, por su inestimable paciencia y dedicación a lo largo de estos años, pero por encima de todo, por su amistad. Este ha sido un camino más largo de lo que nos hubiera gustado, aunque quizá también ha sido más corto de lo esperado. En cualquier caso, ha sido un auténtico placer compartirlo con vosotros. Lo poco o mucho que sé sobre visión del color me lo habéis enseñado vosotros, gracias. Profesionales como vosotros son los que, a pesar de todas las trabas que os ponen cada día, dignifican la universidad española. Es un honor trabajar con vosotros.

Gracias a todos los participantes que han formado parte de esta investigación, por regalarme su tiempo a cambio de palabras, porque sin vosotros nada de esto sería posible.

Al Departamento de Personalidad, Evaluación, y Tratamientos Psicológicos II (Psicología Diferencial y del Trabajo) de la UCM, dónde cursé parte de mi licenciatura y mis becas de iniciación a la investigación y de investigación pre-doctoral. En este departamento he tenido la oportunidad de aprender de grandes personas y grandes profesionales.

I heartily thank Prof. Anna Franklin, leader of the Sussex Colour Group, who introduced me patiently to the field of colour preference. Anna, thanks for being so generous with your time and your knowledge. You have my deepest admiration professionally and personally. I am also indebted to Jenny Bosten, for her encouragement in pursuing a career in science. Thanks to all the members of the Sussex Colour Group for their support and advice, especially to Alice, a great English checker but a better pastry chef.

A mis padres, Paloma y Carlos, y a mi hermana, Laura, por ser un ejemplo de tesón y esfuerzo. Sé que habéis sufrido las consecuencias de que me haya metido en esta dura empresa. Gracias por vuestro tiempo y comprensión, por creer en mí más que yo misma, y por darme siempre lo que ha estado en vuestra mano para que hoy pueda ser quien soy.

A toda mi familia, incluyendo abuelas/os, tías/os y primas/os, y por supuesto a los que ya no están. Gracias a todos por enseñarme tanto, en especial a la abuela Rosa y a la tía Ana, porque sabéis que significáis mucho para mí.

A mis amigos, por mostrar interés y creer en mi trabajo. Gracias a María, David, Inés y Daniel en Cuéllar; Noe, Rober, Caro, Patri, Marta, Patri y Esther, en Fru; Mayk, Mario, Arturo, Laura, Fany y Lorena, en Madrid; y un largo etcétera. Me siento muy afortunada de haber encontrado tanta buena gente en mi camino, gracias por conseguir que de vez en cuando dejase de pensar en colores.

A Abel, porque si hay alguien que sabe que esta tesis ha sido una montaña rusa de emociones, ese eres tú. Gracias por tu apoyo y tus ánimos, siempre a las buenas, siempre a las malas. Gracias por ser mi compañero de aventuras, porque sin ti no me hubiera atrevido a hacer el primer viaje. Gracias por estar siempre preparado para hacer las maletas con tu mejor sonrisa, aunque te haya pedido mudarnos de país hasta cuatro veces. Gracias por escucharme cuando tenía ganas de hablar y por tenderme la mano cuando no tenía ganas de hacerlo. Sabes que sin tu apoyo logístico y emocional, esto no hubiera sido posible. Gracias por ser mi fuente de inspiración.

Esta tesis doctoral ha sido financiada gracias a los proyectos de investigación PSI2008-04166 (concedido por el Ministerio de Ciencia e Innovación) y PSI2012-37778 (concedido por el Ministerio de Economía y competitividad), y por una beca de investigación pre-doctoral de BE48/09 de la Universidad Complutense de Madrid.

Índice

Agradecimientos	11
Índice.....	13
Resumen.....	15
Abstract	19
Capítulo 1. Introducción.....	23
Capítulo 2. Fundamentos de la Percepción del Color: Fotometría y Colorimetría	27
i. Luz y Energía: de la Radiometría a la Fotometría	27
ii. Fotometría y Percepción del Color	32
1. Sistema Visual Humano: Breve Descripción Anatómico-Funcional	32
2. Funciones de Eficiencia Espectral: Visión Fotópica y Escotópica	34
3. Atributos Perceptivos Básicos del Estímulo de Color.....	37
4. Receptores Retinianos y Tricromatismo	39
5. Transmisión de la Señal Visual: Sensaciones y Mecanismos Oponentes	40
iii. Medición del Color: Colorimetría. Espacios y Diagramas de Cromaticidad.....	43
1. Espacios y Diagramas de Colores	43
2. Espacio de Color CIE 1931 XYZ.....	46
3. Diagrama de Cromaticidad CIE 1931 xy	46
4. Espacios CIELUV Y CIELAB.....	51
5. Limitaciones de los Espacios CIELUV y CIELAB	56
Capítulo 3. Alteraciones de la Percepción del Color.....	57
i. Tipos de Alteraciones de la Visión del Color	57
ii. Dicromatismos R-V	61
1. Características Perceptivo-Funcionales.....	61
2. Metámeros y Líneas de Confusión en Dicrómatas.....	65
3. Diagnóstico	66
iii. Alteraciones en la Visión del Color y Problemas Aplicados	70
1. Denominación del Color	70
2. Usos del Color.....	72
3. Consecuencias Aplicadas de las Alteraciones en la Visión del Color.....	75

Capítulo 4. Herramientas de Simulación del Color.....	79
i. ¿Cuál es la Experiencia Perceptiva de un Dicrómata?	79
ii. Evidencia Procedente de Dicrómatas Unilaterales y Dicrómatas Adquiridos	79
iii. Teoría de la Versión Reducida: Modelo de Brettel et al. (1997)	80
iv. Herramientas de Simulación	82
Capítulo 5. Preferencias del Color	85
i. Revisión Histórica de los Estudios de Preferencias del Color	85
ii. Teoría del Contraste de Conos	86
iii. Teoría de las Emociones de las Preferencias del Color	89
iv. Teoría de la Valencia Ecológica de las Preferencias del Color.....	89
v. Beneficios de un Estudio de Preferencias del Color en Dicrómatas R-V	91
Capítulo 6. Objetivos e Hipótesis - Goals and Hypotheses.....	93
i. Un Método Experimental (Simulcheck) para la Evaluación de las Herramientas de Simulación del Color.....	93
1. Objetivos	93
2. Hipótesis.....	93
ii. Preferencias del Color en Dicrómatas Rojo-Verde.....	94
1. Objetivos	94
2. Hipótesis.....	95
iii. An Experimental Method (Simulcheck) for the Assessment of Colour Simulation Tools	96
1. Goals	96
2. Hypotheses	97
iv. Colour Preference in Red-Green Dichromats	98
1. Goals	98
2. Hypotheses	99
Capítulo 7. Conclusiones y Limitaciones - Conclusions and Limitations.....	101
i. Discusión y Conclusiones	101
ii. Limitaciones y Líneas de Investigación Futuras	107
iii. Discussion and Conclusions	112
iv. Limitations and Future Work	118
Referencias	123
Anexos - Appendixes	135

Resumen

Los observadores con visión normal del color (tricrómatas normales) poseen tres tipos de conos retinianos, que responden máximamente a las longitudes de onda larga (conos L), media (M) y corta (S). Los dicromatismos rojo-verde son alteraciones genéticas de la visión del color en las que, aparte del fotopigmento presente en los conos S, únicamente existe otro tipo de fotopigmento, el que contienen los conos L (deuteranopia) o M (protanopia). Afectan a un 2% de los varones y conllevan una discriminación del color reducida y una sensibilidad espectral diferente de la del tricromatismo normal. Los dos estudios empíricos que componen esta tesis se ocupan de la adecuación de las herramientas que simulan los dicromatismos rojo-verde y de las preferencias del color de quienes los padecen.

El primer estudio propone un método, Simulcheck, diseñado para evaluar la precisión de las herramientas de simulación del color y su objetivo principal es comprobar la adecuación de Simulcheck como método de evaluación. Para conseguir este objetivo, se comparó el comportamiento de dicrómatas reales con el de dicrómatas simulados mediante tres herramientas diferentes. El grado de similitud entre el comportamiento de ambos tipos de observadores se utilizó como criterio para evaluar la precisión de las herramientas.

Un grupo de 10 daltónicos dicrómatas (5 protanopes; 5 deuteranopes) y un grupo de 10 tricrómatas normales realizaron dos tareas: (1) identificación de estímulos pseudoacromáticos para determinar los dos ángulos cromáticos (valores h_{uv}) que generaban una respuesta mínima en el mecanismo amarillo-azul y, consecuentemente, la percepción de estímulos pseudoacromáticos; (2) mínimo contraste acromático para determinar el fondo acromático que producía un contraste mínimo (cambio más próximo a cero en el mecanismo acromático) para cada estímulo pseudoacromático seleccionado en la tarea anterior (valores L_R). Se utilizaron dos conjuntos estimulares, ambos con 40 estímulos, que cubrían todo el círculo cromático mediante intervalos de 9° en h_{uv} : en el de croma máximo, los estímulos presentaban la máxima saturación posible del monitor en cada ángulo; en el de croma constante, los estímulos presentaban valores similares en croma y claridad (C^*_{uv} y L^*), definidos por el ángulo de tono menos saturado disponible en la gama del monitor. Se

evaluaron tres herramientas de simulación, una óptica, las gafas Variantor, que realiza una única transformación, y dos informáticas, los softwares Coblis y Vischeck, que realizan transformaciones diferentes para protanopes y deuteranopes. De estas herramientas, únicamente Vischeck indica el algoritmo en el que se basa para realizar las transformaciones: el propuesto por Brettel, Viénot y Mollon (1997). Los tricrómatas normales (dicrómatas simulados) realizaron los experimentos con los estímulos modificados por las herramientas de simulación, mientras que los dicrómatas reales realizaron las tareas con los estímulos originales.

Se hallaron grandes diferencias en las transformaciones realizadas por las tres herramientas evaluadas y en su precisión. Solo Vischeck mostraba alta precisión simulando tanto protanopia como deuteranopia (valores h_{uv} y L_R similares entre dicrómatas reales y simulados), e implementaba de manera adecuada el algoritmo de Brettel et al. (1997). La simulación realizada por Variantor era mucho más adecuada para simular la protanopia, y las simulaciones de Coblis tanto para protanopia como para deuteranopia mostraron altos niveles de error. Simulcheck mostró ser consistente, al presentar valores h_{uv} y L_R similares independientemente del conjunto estimular utilizado, y válido, pues los dicrómatas reales proporcionaron los valores h_{uv} y L_R esperados.

Estos resultados permiten obtener dos conclusiones principales: (1) Simulcheck es un método adecuado para evaluar herramientas de simulación del color. (2) Las herramientas evaluadas difieren en su precisión, siendo Vischeck la más precisa de las evaluadas para simular tanto protanopia como deuteranopia.

El segundo estudio evalúa de manera pionera las preferencias del color en daltónicos dicrómatas y tiene 3 objetivos principales: (1) establecer si el patrón de las preferencias previamente hallado en tricrómatas normales se ve afectado por los dicromatismos rojo-verde; (2) evaluar si la teoría clásica del contraste de conos puede explicar las preferencias del color (Hurlbert & Ling, 2007) en dicrómatas; (3) establecer si otras variables pueden ser explicativas de dicha preferencia.

Un grupo de 32 varones daltónicos dicrómatas (15 protanopes; 17 deuteranopes) y otro grupo de 32 observadores comunes (15 varones; 17 mujeres) realizaron dos tareas: (1) preferencias del color, evaluando de 0 (nada) a 10 (mucho) la respuesta afectiva para cada uno de los 35 estímulos utilizados; (2) denominación del color, nombrando en voz alta con uno de los términos de color básicos del castellano (rojo, verde, amarillo, azul, naranja, morado, rosa, marrón, blanco, negro y gris) cada uno de los estímulos utilizados. Se utilizaron 4 conjuntos estímulares, tres compuestos por 8 estímulos que variaban en tono (versiones saturadas, claras y oscuras de 8 tonos) y otro compuesto por los mejores ejemplares de las 11 categorías de color básicas en castellano.

Mientras los tricrómatas normales mostraron el patrón esperado de preferencias del color (máximo en azul, mínimo en amarillo-verde), los dicrómatas mostraron un patrón diferente, con un máximo en amarillo y una preferencia más débil en azul respecto a los tricrómatas normales. Las preferencias del color estaban más afectadas en protanopes que en deuteranopes. La teoría clásica del contraste de conos explicó parcialmente las preferencias del color en tricrómatas normales, siendo el sistema amarillo-azul el más importante. Para los daltónicos dicrómatas, la teoría clásica no permitió explicar sus preferencias del color, pero sí las variaciones de la misma, siendo nuevamente más relevante el sistema amarillo-azul, pero mostrando evidencia de actividad residual rojo-verde en deuteranopes. Los varones (protanopes, deuteranopes y tricrómatas normales) mostraron mayor preferencia por los colores denominados de manera más precisa, rápida, consistente y consensuada.

Estos resultados permiten obtener 3 conclusiones principales: (1) los dicromatismos rojo-verde afectan a las preferencias del color, sobre todo la protanopia; (2) la teoría clásica del contraste de conos en observadores comunes y las variaciones de la misma en daltónicos dicrómatas, permiten explicar parcialmente las preferencias del color; (3) las variables relacionadas con la fluidez en la denominación del color también permiten explicar parcialmente las preferencias del color en protanopes, deuteranopes y varones con visión normal, pero no en mujeres tricrómatas normales.

Abstract

Common observers (normal trichromats) have three types of cones in the retina. These cones respond maximally to long (L cones), medium (M) and short (S) wavelengths. Red-green dichromatisms are genetic alterations of colour vision which results in only two photopigments: one photopigment in the S cones and another photopigment either in the L cones (deuteranopia) or in the M cones (protanopia). They affect 2% of males and result in reduced colour discrimination and different spectral sensitivity in comparison to normal trichromatism. The two empirical studies of this thesis dissertation deal with the suitability of colour simulation tools that mimic the red-green dichromatisms and the colour preferences of red-green dichromats.

The first study devises a method, Simulcheck, designed to assess the accuracy of colour simulation tools. The main goal of this study is to check the suitability of Simulcheck as an assessment method for these tools. In order to do this, the behaviour of real dichromats and the behaviour of simulated dichromats are compared through three different tools. The similarity degree between both kinds of observers is used as the criterion to assess the accuracy of the assessed tools.

A group of 10 red-green dichromats (5 protanopes; 5 deuteranopes) and a group of 10 normal trichromats performed two tasks: (1) the Pseudoachromatic Stimuli Identification task to determine the two chromatic angles (h_{uv} values) that generate a minimum response in the yellow-blue mechanism and, consequently, the perception of pseudoachromatic stimuli; (2) the Minimum Achromatic Contrast task to determine the achromatic background that produced a minimum contrast (change near zero in the achromatic mechanism) for each pseudoachromatic stimulus selected in the previous task (L_R values). Two 40 stimulus sets were used, covering the full chromatic circle by intervals of 9° in h_{uv} : in the maximum chroma set, the stimuli were presented at the maximum possible saturation for the screen in each angle; in the constant chroma set, the stimuli were presented with similar values of chroma and lightness (C^*_{uv} and L^*), as defined by the less saturated angle available in the screen gamut. Three simulation tools were assessed: the optic tool Variantor glasses, which

performs only one type of simulation; the software tools Coblis and Visccheck, which perform two different simulations for protanopia and deuteranopia. Visccheck was the only tool that indicated which algorithm it used to perform its transformations: the algorithm proposed by Brettel, Viénot and Mollon (1997). Normal trichromats (simulated dichromats) performed the experiments using the stimuli modified by the simulation tools, while the real dichromats used the original stimuli.

There were large differences both in the transformations performed by the three simulation tools and in their accuracy levels. Only Visccheck showed high accuracy simulating both protanopia and deuteranopia (similar h_{uv} and L_R values between real and simulated dichromats) and an accurate implementation of the Brettel et al. (2007) algorithm. The only simulation performed by Variantor was more accurate at simulating protanopia than deuteranopia. Coblis' simulations showed high error levels both for protanopia and deuteranopia. Simulcheck was a consistent method presenting similar h_{uv} and L_R values independently of the stimulus set used. Simulcheck is also valid because the real dichromats provided the expected h_{uv} and L_R values.

Two main conclusions can be derived from these results: (1) Simulcheck is a suitable method to assess colour simulation tools. (2) The assessed tools differ in their accuracy, with Visccheck being the more accurate tool from the ones assessed both for simulating protanopia and deuteranopia.

The second study is the first to study the colour preferences of red-green dichromats. The study has three main goals: (1) To establish if the preference pattern previously found in normal trichromats is affected by red-green dichromacy; (2) To assess if the classic cone-contrast theory account for the pattern of colour preference (Hurlbert & Ling, 2007) in red-green dichromats; (3) To establish if other variables can explain this preference.

A group of 32 males with red-green dichromacy (15 protanopes; 17 deuteranopes) and a group of 32 common observers (15 males; 17 females) performed two tasks: (1) Colour preference: to rate from 0 (nothing at all) to 10 (very much) the preference for each one of

the 35 stimuli used; (2) Colour Naming: to name out loud with one of the basic colour terms in Spanish (red-*rojo*, green-*verde*, yellow-*amarillo*, blue-*azul*, orange-*naranja*, purple-*morado*, pink-*rosa*, brown-*marrón*, white-*blanco*, black-*negro* and grey-*gris*) each of the stimuli used. There were four stimulus sets. Three of them were composed of 8 stimuli that varied in hue (saturated, light and dark versions of 8 hues) and the fourth was composed by the best exemplars of the 11 basic colour categories in Spanish.

While the normal trichromats showed the expected preference pattern (maximum preference at blue, minimum at yellow-green), red-green dichromats showed a different pattern, with a maximum preference at yellow and a weaker preference at blue in comparison to normal trichromats. Colour preference was more affected in protanopes than in deuteranopes. The classic cone-contrast theory partially explained the colour preference in normal trichromats, with the yellow-blue system being the most important. For the red-green dichromats, the classic cone-contrast theory did not explain their colour preference, but variations of this theory did, with again the yellow-blue system being the most relevant for explaining the pattern of preference, but also showing evidence of red-green residual activity in deuteranopes. Males (protanopes, deuteranopes and normal trichromats) showed a higher preference for the colours named more accurately, quicker, more consistently and with greater consensus.

These results allow us to draw the following main conclusions: (1) Red-green dichromatisms affect colour preference, especially protanopia; (2) The classic cone-contrast theory in common observers and the variations of such theory in red-green dichromats allow us to partly explain colour preference; (3) The variables related with the fluency in colour naming also allow us to partly explain colour preference in protanopes, deuteranopes and normal trichromat males, but not in normal trichromat females.

Capítulo 1. Introducción

El equipo de investigación dirigido por el catedrático de Ergonomía Julio Lillo, desarrolla desde hace más de 10 años diversas líneas de investigación. Las más relevantes para esta tesis doctoral son las siguientes: (1) deficiencias en la visión del color (Lillo & Moreira, 2013; Lillo, Moreira, Álvaro, & Davies, 2014; Moreira, Lillo, Álvaro, & Davies, 2014) y (2) ergonomía visual y usabilidad (Lillo, 2000; Lillo, Moreira, Álvaro, & Majarín, 2013; Lillo, Moreira, Álvaro, & Sánchez, en prensa). Esta tesis se ocupa sobre todo de la primera línea de investigación, pues estudia dos aspectos de las deficiencias de la visión del color: las herramientas que las simulan y las preferencias del color de quienes las padecen. Por otra parte, también se relaciona con la segunda línea de investigación, pues proporciona resultados útiles para hacer recomendaciones de carácter ergonómico.

Las preguntas concretas a las que se intenta responder en esta tesis, parcial o totalmente, son las siguientes:

- ¿Qué parámetros son relevantes para evaluar herramientas de simulación del color?
- ¿Existe/n actualmente alguna/s herramienta/s de simulación que simulen adecuadamente la visión dicrómata protanope y/o deuteranope?
- ¿Cómo son las preferencias del color en las personas con visión dicrómata protanope y deuteranope?
- ¿Qué mecanismos determinan las preferencias del color en observadores con y sin alteraciones en la visión del color?

Las dos primeras preguntas se responden a partir de la primera investigación incluida en la presente tesis doctoral. Tal investigación es continuación del estudio realizado para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados (DEA). Mi estancia en la Universidad de Sussex junto con el equipo de investigación de Anna Franklin dio lugar a la segunda investigación.

En el grupo de investigación de la Universidad de Sussex se habían realizado estudios de preferencias del color en poblaciones con visión normal. En paralelo, el grupo de investigación de la Universidad Complutense se ocupaba de la cognición del color en daltónicos dicrómatas. La buena relación existente entre ambos equipos y, obviamente, el conocimiento por parte de cada equipo de los trabajos realizados por el otro, dieron lugar de manera natural a la necesidad de realizar una investigación para responder a las dos últimas preguntas incluidas en esta tesis (y que complementan las anteriores). En síntesis, la parte empírica se concreta en dos investigaciones pioneras en el ámbito de la percepción y la cognición del color. Una relacionada con la evaluación de las herramientas de simulación del color (creación y evaluación de un método, Simulcheck, para evaluar dichas herramientas). La otra con el estudio de las preferencias del color (evaluación pionera de preferencias en daltónicos dicrómatas). Ambas investigaciones se ocupan de cómo es la percepción y la cognición del color en personas que tienen tipos concretos de alteraciones de la visión del color: protanopia o deuteranopia, los dos tipos de daltonismo dicrómata.

La primera de las investigaciones realizó un doble tipo de evaluación. De una parte, utilizó el método “Simulcheck”, desarrollado por nuestro equipo, para evaluar tres herramientas de simulación que dicen imitar la visión de protanopes y deuteranopes. De otra parte, evaluó el propio método de evaluación (Simulcheck).

La doble evaluación realizada usó datos colorimétricos y comparativos. Los datos colorimétricos sirvieron para estudiar las transformaciones estimulares realizadas por las herramientas de simulación. Los datos comparativos indicaron el grado de semejanza en el desempeño de las tareas incluidas en Simulcheck cuando fueron realizadas por daltónicos reales o por daltónicos simulados usando una determinada herramienta. Obviamente, tal herramienta se consideró tanto más adecuada cuanto mayor fue la semejanza entre los daltónicos reales y los simulados. Por otra parte, en lo que tiene que ver con la propia evaluación de Simulcheck, esta fue tanto más positiva cuanto más fiables y adecuadas (válidas) fueron las conclusiones que proporcionaba sobre cada herramienta de simulación.

La segunda investigación estudió las preferencias del color en daltónicos dicrómatas. Como ya adelantamos, el estudio realizado es pionero en este ámbito y resultó de la convergencia de intereses entre los equipos de Sussex y Complutense de Madrid. Debido a su carácter pionero, la investigación tiene un importante componente exploratorio (¿qué colores son los preferidos por los daltónicos dicrómatas?). Por otra parte, y en gran medida gracias a los trabajos previamente realizados por el equipo de Sussex, la investigación tiene también un componente comparativo (¿son las preferencias del color similares entre observadores comunes y dicrómatas?). Para terminar, la investigación tiene también un componente explicativo, ya que evalúa la capacidad de ciertos modelos (p. ej. el de “las respuestas oponentes de los mecanismos rojo-verde y amarillo-azul”) para explicar las preferencias del color.

Terminaremos esta sección introductoria describiendo la estructura de esta tesis. Sus dos partes principales son una parte teórica (capítulos 2 a 5) y otra empírica (del capítulo 6 en adelante).

La parte teórica se ocupa de las bases de la fotometría y la colorimetría ([capítulo 2](#)), los tipos de deficiencias de la visión del color estudiados ([capítulo 3](#)), y los conceptos básicos referentes a las herramientas de simulación del color ([capítulo 4](#)) y a las preferencias del color ([capítulo 5](#)). A continuación se incluyen los objetivos e hipótesis de las investigaciones que componen la presente tesis ([capítulo 6](#)), divididos en dos partes, una para cada uno de los artículos que conforman la contribución más importante de esta tesis. Tales artículos se incluyen en los [anexos](#). Por último, la tesis finaliza con la discusión y las conclusiones más relevantes, además de las limitaciones y líneas de investigación futuras ([capítulo 7](#)). Tanto los objetivos e hipótesis ([capítulo 6](#)) como las limitaciones y líneas de investigación futuras ([capítulo 7](#)) se presentan tanto en castellano como en inglés.

Capítulo 2. Fundamentos de la Percepción del Color: Fotometría y Colorimetría

i. Luz y Energía: de la Radiometría a la Fotometría

El sistema visual humano (SVH) es el transductor y procesador de energía de nuestro cuerpo que posibilita la percepción del color. Puede ser activado por diferentes tipos de energía, pero es la electromagnética la que le hace responder en plenitud (Kaiser & Boynton, 1996; Le Grand, 1972). Para referirnos a la porción del espectro electromagnético que produce experiencias visuales y que, por tanto, constituye el soporte estimular en el que se basa el funcionamiento del SVH, habitualmente utilizamos una denominación mucho más sencilla, breve y cotidiana: luz. La naturaleza de la luz ha sido motivo de debate desde el siglo XVII y muchas de las investigaciones en torno a ella se pueden encuadrar en dos posiciones teóricas: la teoría corpuscular y la teoría ondulatoria (Lillo, 1993).

La teoría corpuscular, propuesta por Sir Isaac Newton (1704, citado por Mollon, 2003), describe la luz como un flujo de partículas que viajan en línea recta y que se desprenden de los cuerpos luminosos. Contemporáneo de Newton fue Huygens (1673, citado por Mollon, 2003), precursor de la teoría alternativa: la teoría ondulatoria. La teoría ondulatoria describe la luz como una onda periódica que se desplaza en el espacio. La ausencia de base matemática del modelo de Huygens, y el tremendo prestigio de Newton en la sociedad científica de la época hicieron que los trabajos del primero tuvieran poca repercusión. No obstante serían retomados por Young (1804, citado por Mollon, 2003), que proporcionó apoyo experimental al modelo, y más tarde por Fresnel (1815, citado por Nassau, 2003), que le daría la base matemática. Posteriormente Maxwell (1860, citado por Mollon, 2003) reforzaría la teoría explicando la naturaleza electromagnética de las ondas luminosas, que más tarde sería apoyada por los experimentos de Hertz (1892, citado por B. J. Hunt, 2005).

Sin embargo, a pesar de toda la base matemática y experimental con que contaba la teoría ondulatoria, seguía siendo incapaz de explicar todos los fenómenos luminosos. Por ello

Einstein (1905, citado por B. J. Hunt, 2005) retomó la teoría corpuscular, proponiendo que la luz estaba formada por una sucesión de cuantos elementales (los fotones) que, a modo de paquetes de energía, interactuaban con las superficies de los objetos iluminados arrancando de sus átomos los electrones más externos.

En la actualidad se considera que las teorías corpuscular y ondulatoria son parcialmente adecuadas y, lo que es más importante, complementarias: ciertos fenómenos son mejor explicados por cada una de ellas. Por tanto, es común considerar que, en ocasiones, la luz actúa como un flujo de partículas, pero en otras lo hace como si estuviera formada por ondas (Goodman, 2010; Kaiser & Boynton, 1996; Packer & Williams, 2003). En síntesis, se trata de un flujo de partículas de energía denominadas fotones que son radiadas en forma de ondas (Hurvich, 1981; Kaiser & Boynton, 1996); están producidas por cargas eléctricas y se definen en función de su longitud de onda (la distancia entre dos máximos consecutivos en la onda).

El conjunto de ondas electromagnéticas de todas las longitudes de onda, visibles y no visibles, se denomina espectro electromagnético. Se trata de un continuo que va desde energías con longitudes de onda muy cortas o rayos gamma (10^{-14-12} metros) hasta energías con longitudes de onda más largas u ondas de radio ($1-10^4$ metros; Frisby & Stone, 2010, cap. 17). Solo una porción reducida de esta energía es detectada por el SVH, pues éste solo responde a las estimulaciones que tienen longitudes de onda comprendidas entre algo menos de 400 y algo más de 700 nanómetros, siendo un nanómetro equivalente a la milmillonésima parte de un metro, es decir, 10^{-9} metros. Aunque su correspondencia no es perfecta, ciertas longitudes de onda se asocian a determinados tonos (p. ej. amarillo a 575 nm, rojo a 700 nm, etc.). Como puede apreciarse en la Figura 1, cada color pasa gradualmente al siguiente, por lo que la relación entre la longitud de onda de la estimulación y la tonalidad percibida debe tomarse solo como una aproximación. Además, como veremos más adelante (véase [apartado 2.ii.2](#)), las condiciones de presentación, las características del SVH y las características de la propia estimulación también intervienen en el tono percibido.

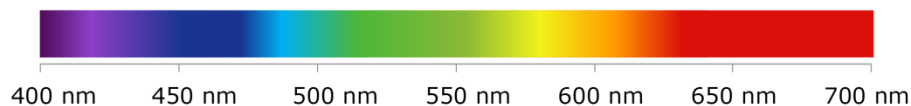


Figura 1. Espectro visible por el ser humano.

Los primeros estudios sobre el espectro y los componentes espectrales fueron iniciados por Newton (1671, citado por Mollon, 2003). Como es bien conocido, en uno de sus famosos experimentos Newton colocó un prisma óptico en una habitación completamente oscura y en una de las paredes de la misma realizó una abertura de 1/3 de pulgada de diámetro a través de la que entraban los rayos solares. Estos rayos incidían directamente en el prisma y, a través del mismo, se dispersaban en un abanico que Newton bautizó como espectro. Para saber si los colores componentes de la luz blanca estaban a su vez compuestos por otros elementos repitió el experimento con ciertas variaciones: oscureció mediante una tarjeta con una rendija todo el espectro excepto el tono que le interesara en cada caso e hizo pasar estos rayos por un segundo prisma. Sin embargo ninguna tonalidad se descompuso nuevamente. Este hallazgo permitió a Newton ser el primero en postular que la luz blanca no es una entidad homogénea sino que se trata de una mezcla de distintos tipos de energía, cada uno de los cuales, cuando se presenta por separado, produce la experiencia de un tono distinto (R. W. G. Hunt & Pointer, 2011, cap. 1). Además, Newton fue el primer científico en distinguir claramente entre la energía física que permite la visión y el resultado que produce en el SVH. En sus propias palabras:

“[...] for the rays, to speak properly, are not coloured. In them there is nothing else than a certain power and disposition to stir up a sensation of this or that colour” (Newton, 1730/1952, p. 124; Optics. 4th edition. Reprint New York: Dover)

....ya que los rayos, si se desea hablar adecuadamente, carecen de color. En ellos no hay más que cierta capacidad o disposición para generar la sensación de uno u otro color”.

Esto es, una cosa son los “rayos” (la energía física) que llegan a la retina del observador, y otra, completamente distinta, la experiencia visual (los colores) que crea el cerebro en respuesta a tal energía. Siguiendo la separación propuesta por Newton, en la actualidad existen dos disciplinas científicas distintas, la radiometría y la fotometría, que

sirven para medir dos aspectos cuantitativos distintos de los estímulos luminosos. Una, la radiometría, permite medir cantidades de energía en cualquier tipo de estímulo, con independencia de que éste produzca efectos visibles (p. ej. la energía radiante visible emitida por una bombilla) o no visibles (p. ej. la energía radiante infrarroja emitida por la misma bombilla). Otra, la fotometría, proporciona mediciones que se relacionan más directamente con la experiencia visible (p. ej. para determinar entre dos bombillas cuál brilla más).

Dos son los principales parámetros radiométricos (puramente físicos) relacionados con la iluminación: (1) La citada longitud de onda, parámetro que informa del tipo de energía, y que se mide en nanómetros (nm) y (2) la potencia o flujo radiante, parámetro que especifica la cantidad de energía, y se mide en vatios (W). Las mediciones radiométricas no permiten determinar el efecto de la energía en el observador. Por ejemplo, no es posible saber a partir de solo los vatios consumidos por dos bombillas, cuál de las dos brilla más en la oscuridad. Esto es así debido a los siguientes hechos: (1) El SVH no es igualmente sensible a la energía de las distintas longitudes de onda. (2) No todas las longitudes de onda producen efectos visibles. (3) Existen variaciones inter-observadores.

Considerando únicamente los dos primeros hechos que se acaban de mencionar (el tercero se comentará en el [capítulo 3](#)), la fotometría nació para proporcionar un tipo de medición (de carácter psicofísico) en el que se pondera la energía acumulada en las distintas longitudes de onda en función de su eficacia relativa respecto al SVH. Gracias a ello se obtienen mediciones más informativas que las radiométricas respecto a los efectos visibles que produce una estimulación. Las ponderaciones utilizadas por la fotometría se efectúan mediante las Funciones de Eficiencia Espectral (FEE), que describiremos más adelante. En la Tabla 1 se muestran las medidas y unidades fotométricas más importantes (y sus correspondientes radiométricas). Éstas son las siguientes:

- Flujo luminoso: total de energía visible proporcionada por una fuente. Se obtiene ponderando el flujo radiante (cantidad de energía, vatios) mediante la correspondiente FEE. Su unidad es el lumen.

- Intensidad lumínica: lúmenes emitidos en una dirección determinada. Se mide en candelas (cd).

$$cd = \text{lumen} / \text{estereorradián} = lm / Sr \quad (1)$$

- Iluminancia: lúmenes que inciden en una determinada superficie. Su unidad de medida es el lux.

$$lux = \text{lumen} / m^2 = lm / m^2 \quad (2)$$

- Luminancia: lúmenes enviados por una superficie en una dirección determinada teniendo en cuenta las dimensiones de la superficie. Se mide en cd/m^2 . En origen, esta medida se llamó nit, pero el término ha caído en desuso.

$$nit = \text{candela} / m^2 = cd / m^2 \quad (3)$$

Tabla 1.

Principales unidades radiométricas y fotométricas. Adaptado de Lillo (1993, Tabla 6.1).

RADIOMETRÍA			FOTOMETRÍA		
Medida	Símbolo	Unidad	Medida	Símbolo	Unidad
Flujo radiante	P_e	Vatio (W)	Flujo luminoso	P_v	Lumen (lm)
Intensidad radiante	I_e	W/Sr	Intensidad lumínica	I_v	Candela (cd) (lm/Sr)
Irradiancia	E_e	W/m ²	Iluminancia	E_v	Lux (lm/m ²)
Radiancia	L_e	W/(Sr·m ²)	Luminancia	L_v	cd/m ² = lm/(Sr·m ²)

ii. Fotometría y Percepción del Color

1. Sistema Visual Humano: Breve Descripción Anatómico-Funcional

El sistema visual es una estructura compleja con dos órganos principales que, respectivamente, reciben e interpretan la energía visual: el ojo y el cerebro. El ojo es una esfera de unos 24 mm de diámetro que contiene un líquido transparente llamado humor acuoso (compuesto en un 99% por agua). La pared ocular se divide en tres capas. De la más exterior a la más interior son: la esclerótica, la coroides y la retina. La esclerótica tiene la función de proteger y modelar el ojo. Su parte visible es popularmente conocida como “el blanco del ojo”. La capa intermedia o coroides mantiene la temperatura constante y nutre otras estructuras oculares. La capa más interior, la retina, es la más importante para la visión, pues en ella se sitúan los receptores visuales. Antes de alcanzar la retina, la luz atraviesa la córnea, la pupila, orificio central del iris que varía su tamaño para permitir entrar más o menos luz (2 mm de diámetro en condiciones de alta iluminación; 8 mm en condiciones de baja iluminación; R. W. G. Hunt & Pointer, 2011, cap. 1), y el cristalino, una lente situada en el interior del globo ocular. Estos elementos son responsables del enfoque visual; en concreto, el cristalino modifica su curvatura dependiendo de la distancia a la que se sitúe el origen de la estimulación lumínica recibida por el ojo. Posteriormente la luz, aún como energía electromagnética, incide en la retina.

La retina es una película transparente de 0,5 mm que cubre dos tercios del fondo del ojo y que puede dividirse en la fovea (1,5° de diámetro del campo visual, dentro de ella la foveola, 1°) y la periferia, dentro de la cual la visión cromática solo se mantiene hasta aproximadamente 40° de ángulo visual hacia cada extremo horizontal del eje visual. Esta división retiniana se basa en su dispar composición celular que tiene como consecuencia una sensibilidad diferencial ante distintos tipos de estimulaciones. La retina tiene aproximadamente 126 millones de fotorreceptores (Frisby & Stone, 2010, cap. 6): los conos y los bastones. El nombre de estos dos tipos de fotorreceptores proviene de su forma, pero también difieren en otros aspectos anatómicos y funcionales (véase Tabla 2). Además,

pueden distinguirse tres tipos de conos: protoconos, deuteraconos y tritaconos, que serán descritos en detalle en el [apartado 2.ii.4](#).

Tabla 2.

Características anatómico-funcionales de los fotorreceptores retinianos.

	Conos	Bastones
Forma	Varilla de extremo cónico	Varilla de extremo romo
Cantidad	6 millones en cada ojo	120 millones en cada ojo
Disposición retiniana	Toda la retina; alta concentración en la foveola y la fóvea, disminuyendo su ratio con el ángulo visual.	Ausentes en la foveola, presentes en el resto de la retina, aumentando su ratio con el ángulo visual.
Funcionalidad	Visión en color en condiciones de alta luminosidad o fotópicas, a partir de varias cd/m^2 .	Visión en blanco y negro en condiciones de baja luminosidad o escotópicas, con centésimas de cd/m^2 o menos.

Cuando la energía electromagnética alcanza los conos y bastones retinianos, se desencadena una reacción fotoquímica y se produce la transducción que transforma la luz en impulsos nerviosos que se transmiten al cerebro a través del nervio óptico. El tipo de conexión (grado de convergencia) con el nervio óptico varía en función de la región retiniana: en la foveola se da un bajo grado de convergencia, ya que existe aproximadamente el mismo número de fibras nerviosas que de fotorreceptores (conos); pero existe una relación inversa entre la excentricidad y el ratio fibras-fotorreceptor, de manera tal que en la periferia cientos de bastones comparten una misma fibra nerviosa (alta convergencia). Aproximadamente existe 1 millón de fibras nerviosas en cada ojo, que finalmente confluyen en el nervio óptico. La región retiniana en la que se sitúa se conoce como punto ciego, pues en ella no existen fotorreceptores. Está situada a unos 14° de la fóvea (R. W. G. Hunt & Pointer, 2011, cap. 1).

La activación de los cuatro fotorreceptores se combina en tres tipos de señales distintas que se transmiten a las neuronas, que se corresponden aproximadamente con los tres

mecanismos oponentes (rojo-verde, amarillo-azul y claro-oscuro) que describiremos en detalle en el [apartado 2.ii.5](#). En el siguiente [apartado](#) se detallará cómo la fotometría integra información radiométrica con el funcionamiento del sistema visual.

2. Funciones de Eficiencia Espectral: Visión Fotópica y Escotópica

La fotometría proporciona mediciones relacionadas con la magnitud de la experiencia visual (cantidad de luz) combinando dos tipos de información. Por una parte la cantidad de energía acumulada en cada una de las longitudes de onda visibles (medición radiométrica de la energía). Por otra, la ponderación de tales cantidades mediante la correspondiente función (Función de Eficiencia Espectral, FEE) homologada por la CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage* o Comisión Internacional de la Iluminación). Tal ponderación es el resultado de estimar la capacidad de respuesta de los fotorreceptores del sistema visual ante las distintas longitudes de onda. La sensibilidad (o capacidad de respuesta) de un fotorreceptor se define como su output ante un determinado input dividido por la energía radiante de tal input. Si la capacidad de respuesta se expresa en función de la longitud de onda se denomina sensibilidad espectral. Sin embargo, no existe una sola función de ponderación, pues la sensibilidad relativa de nuestro sistema visual varía en función de una serie de condiciones, entre las que se incluyen: (1) el tamaño de la estimulación, (2) su intensidad relativa y (3) las características del sistema visual del observador.

El tamaño de la estimulación se refiere a los grados de ángulo visual de la estimulación recibida por la retina. La sensibilidad diferencial de nuestro sistema visual en función del tamaño estimular se relaciona, entre otros factores, con la presencia del pigmento macular en la fovea y parafovea, pero no en la periferia. Se trata de un pigmento amarillento que define una zona central en la retina a la que se denomina macula lútea. No está claro si su función es meramente protectora (absorción de rayos ultravioleta, Frisby & Stone, 2010, cap. 6) o también incrementa el rendimiento visual reduciendo la aberración cromática y la dispersión de la luz (Loughman, Davison, Nolan, Akkali, & Beatty, 2010), pero esta zona está especializada en la visión fina de los detalles. Para tener en cuenta los cambios en la sensibilidad espectral asociados al tamaño estimular se han confeccionado funciones de

eficiencia espectral distintas para estímulos grandes (más de 10° de ángulo visual) y pequeños (véase más adelante).

La segunda condición que influye en la sensibilidad espectral es la intensidad estimular, y permite definir dos grandes tipos de visión: fotópica y escotópica, con una zona de transición denominada mesópica. La visión fotópica es visión cromática a niveles normales-altos de iluminación (varias cd/m^2), y en estas situaciones, los receptores que actúan fundamentalmente son los conos. La visión escotópica es monocromática (permitiendo la diferenciación de intensidades, no de tonalidades) a niveles bajos de iluminación (centésimas de cd/m^2), y en estas situaciones, los receptores que actúan fundamentalmente son los bastones. Hay un cambio gradual de la visión fotópica a la escotópica, en cuyo punto intermedio, conocido como visión mesópica, ambos tipos de receptores actúan conjuntamente. Estas condiciones son habituales en los escenarios nocturnos exteriores y bajo alumbrado público vial (CIE, 1978a).

Debido a esta dualidad se han obtenido dos funciones diferentes (véase Figura 2), una relacionada con la visión fotópica $V(\lambda)$, otra con la visión escotópica $V'(\lambda)$. Para una descripción de los métodos de obtención de las mismas, véase R. W. G. Hunt y Pointer (2011, p. 39). La primera de estas funciones sigue siendo la que utilizan en la actualidad los aparatos fotométricos estándar, aún y cuando la propia CIE haya recomendado recientemente una función más adecuada [$V_M(\lambda)$, CIE, 1990] para sustituir a $V(\lambda)$. Entre otras mejoras, ésta última incluye la revisión de Judd (1951) para corregir la ponderación efectuada para las longitudes de onda corta (Figura 3). Existe otra función fotópica (véase Figura 3) para estímulos de más de 10° de ángulo visual (CIE, 1964).

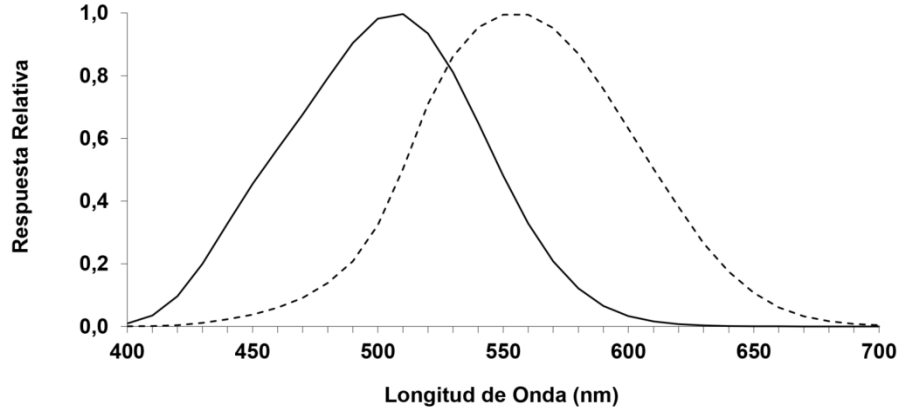


Figura 2. Funciones de eficiencia espectral (FEE) para condiciones de observación fotópicas [$V(\lambda)$, línea discontinua] y escotópicas [$V'(\lambda)$, línea continua]. Valores tabulados en R. W. G. Hunt y Pointer (2011, Apéndice 2).

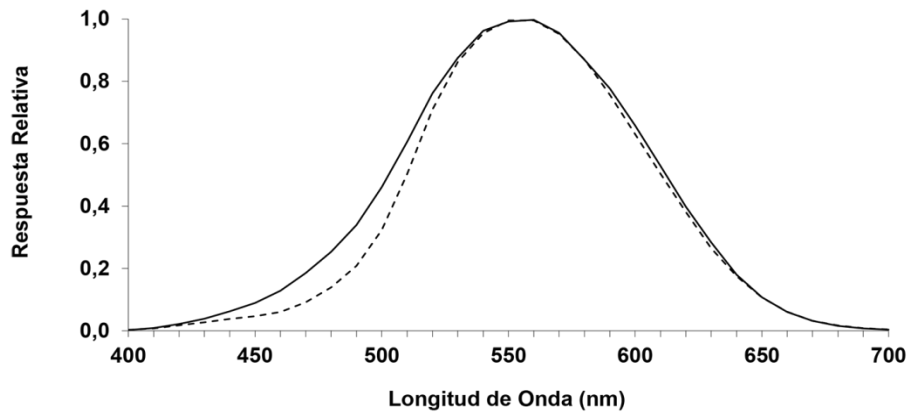


Figura 3. Funciones de eficiencia espectral (FEE) para condiciones de observación fotópicas, con la corrección para longitudes de onda corta de Judd [1951, $V_M(\lambda)$, línea discontinua] y para estímulos de más de 10° de ángulo visual (CIE, 1964, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, línea continua). Valores tabulados en R. W. G. Hunt y Pointer (2011, Apéndices 2 y 3).

La tercera condición es la más crucial para el presente trabajo de investigación. Las variaciones en el sistema visual entre observadores hacen que una misma función de ponderación no sea válida para todos ellos. Se podrían considerar dos tipos de diferencias entre observadores: diferencias individuales entre personas con visión normal y diferencias causadas por alguna alteración.

Las diferencias individuales entre personas con visión normal surgen principalmente de disparidades en la densidad macular y están parcialmente compensadas por el hecho de que las funciones de ponderación descritas en el párrafo anterior son creadas con los ajustes promedio de un grupo de observadores. Sin embargo, en relación a las diferencias causadas por alteraciones en la percepción del color, la situación es más compleja. Por un lado estaría el grupo de observadores más numeroso y que goza de visión normal: los tricrómatas normales. Por otro, un grupo sensiblemente más reducido formado por observadores con diferentes alteraciones que producen incrementos (tetracrómatas, Jordan, Deeb, Bosten & Mollon, 2010; portadoras de protanomalia, Konstantakopoulou, Rodriguez-Carmona & Barbur, 2012) o reducciones (p. ej. protanopia o deuteranopia, R. W. G. Hunt & Pointer, 2011; portadoras de deuteranomalía, Konstantakopoulou et al., 2012) en la capacidad para diferenciar estímulos cromáticos. Sobre protanopia y deuteranopia hablaremos en detalle en el [capítulo 3](#), pues son la población objetivo de la presente tesis doctoral.

3. Atributos Perceptivos Básicos del Estímulo de Color

Durante mucho tiempo ha sido común basar la descripción de los estímulos cromáticos en solo tres-cuatro dimensiones (véase, por ejemplo, Lillo, 1999). En las dos últimas décadas tal número tiende a incrementarse a seis (R. W. G. Hunt & Pointer, 2011, cap. 1; Shevell, 2003). Concretamente, las dimensiones consideradas en las descripciones más clásicas de los colores han sido las de tono, saturación y brillo (aplicado a colores no relacionados o de apertura: luces sin contexto) o claridad (aplicada a colores relacionados: superficies y colores que imitan superficies). Las dos nuevas dimensiones que se han incluido recientemente son croma y colorido. A continuación se definen las 6 dimensiones mencionadas. En función de lo indicado en R. W. G. Hunt y Pointer (2011, cap. 1):

- Tono o matiz (*hue* en inglés)¹: cualidad cromática percibida (p. ej. verde, morado, etc.). Se aplica tanto a colores relacionados como no relacionados. Se relaciona con la longitud de onda dominante.
- Luminosidad o brillo (*brightness* en inglés)¹: atributo de la sensación visual de acuerdo con el cual un estímulo dado parece ser más o menos luminoso o emitir más o menos luz (p. ej. brillante o tenue). Se aplica tanto a colores relacionados como de apertura. Se relaciona con la intensidad.
- Claridad (*lightness* en inglés): atributo de sensación visual de acuerdo con el cual un estímulo visual parece emitir más o menos luz comparado con un área blanca o de alta transmitancia similarmente iluminada (p. ej. claro u oscuro). Es un atributo de brillo relativo. Solo puede aplicarse a colores relacionados. Se relaciona con la intensidad.
- Colorido (*colorfulness* en inglés): atributo de la sensación visual de acuerdo con el cual un área parece exhibir más o menos su tono. Se aplica tanto a colores relacionados como no relacionados. Se relaciona con la intensidad y la pureza de excitación (será definida en el [apartado 2.iii.3](#)).
- Saturación (*saturation* en inglés): colorido de un área juzgada en proporción a su brillo (p. ej. verde vivo, verde apagado, etc.). Se aplica tanto a colores relacionados como de apertura. Se relaciona con la intensidad y la pureza de excitación (será definida en el [apartado 2.iii.3](#)).
- Croma (*chroma* en inglés): colorido de un área juzgada en proporción al brillo de un área blanca o de alta transmitancia similarmente iluminada. Solo puede aplicarse a colores relacionados. Se relaciona con la intensidad y la pureza de excitación (será definida en el [apartado 2.iii.3](#)).

Ninguna de las dimensiones perceptivas guarda una relación perfecta con una sola dimensión física o psicofísica. Este incumplimiento se relaciona con lo que se ha denominado

¹Tradicionalmente, en la literatura psicológica se ha traducido *brightness* por brillo y *hue* por matiz (véase p. ej., Lillo, 1993), pero los términos que se emplea en la literatura especializada en color son los de luminosidad y tono (véase p. ej. el Vocabulario del Color elaborado por el Comité Español de Color de la Sociedad Española De Óptica en 2002, disponible en: <http://www.sedoptica.es/SEDO/color/docs/publicaciones/vocabulario-del-color.pdf>).

“ruptura del principio de suficiencia energética cualitativa” (Lillo, 2000) . De acuerdo con él, los aspectos *cuantitativos* de la percepción del color (p. ej. brillo) dependerían solo de los cuantitativos en la estimulación (intensidad fotométrica). En modo similar, los aspectos *cualitativos* (p. ej. tono) de la percepción solo dependerían de aspectos cualitativos estimulares (longitud de onda dominante).

Debido al incumplimiento del principio de suficiencia energética cualitativa, no es posible especificar-medir cada una de las dimensiones perceptivas de los colores mediante la medición de una sola dimensión física o psicofísica de la estimulación. Más adelante (véase [apartado 2.iii.1](#)) se describen las dimensiones desarrolladas por la CIE para medir, de modo solo parcialmente adecuado, las dimensiones perceptivas que se acaban de describir. Para entender mejor sus virtudes y limitaciones debemos primero efectuar un breve resumen sobre cómo codifica el color el SVH.

4. Receptores Retinianos y Tricromatismo

En la actualidad existe acuerdo en que la codificación del color por parte del observador se realizaría a dos niveles (Kaiser & Boynton, 1996; Lillo, 2000): (1) El primero se basa en la existencia de tres tipos de conos (receptores retinianos). (2) El segundo en tres mecanismos perceptivos de carácter oponente (amarillo-azul, rojo-verde y claro-oscuro).

Como indicábamos anteriormente, en condiciones de observación fotópicas, en las que el observador disfruta de visión cromática, los fotorreceptores que actúan son los conos. El primer nivel de codificación del color se basa en la existencia de tres tipos de conos en la retina del observador humano común. La diferencia fundamental entre los tres tipos de conos se halla en el pigmento que contienen. Cada uno de los tres tipos de pigmentos tiene un espectro de absorción diferente (Frisby & Stone, 2010, cap. 17), siendo especialmente sensibles a una parte distinta del espectro: longitudes de onda largas, medias y cortas, respectivamente (Figura 4). A causa de esta sensibilidad diferencial se les denomina conos L (máxima sensibilidad en 560 nm, también denominados protoconos o conos γ), conos M (máxima sensibilidad en 540 nm, también denominados deuteraconos o conos β) y conos S

(máxima sensibilidad en 440 nm, también denominados tritaconos o conos p). Como puede verse en la Figura 4, las curvas de sensibilidad de los dos primeros tipos de conos tienen un alto grado de superposición. Esto hace que gran parte de las longitudes de onda que provocan respuesta en uno de ellos lo haga también en el otro. Sin embargo, debe matizarse que los conos M responden más ante luces monocromáticas (acumulan energía en una sola longitud de onda) que tienden a percibirse verdes o verde-amarillentas y los conos L responden más ante las que tienden a percibirse naranjas o rojo-amarillentas.

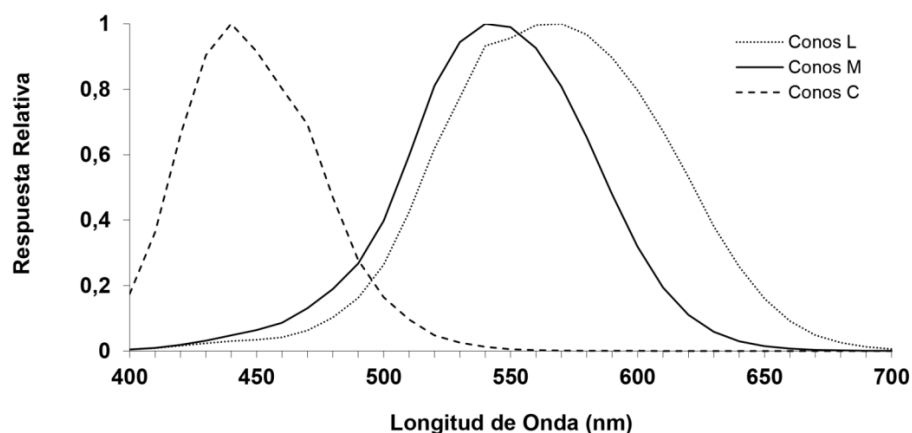


Figura 4. Curvas de respuesta relativa de los conos a partir de los fundamentales de los conos de V. C. Smith y Pokorny [1972, valores tabulados en Wyszecki & Stiles, 1982, Tabla 2(8.2.5)].

De la existencia de tres tipos de conos se deriva el principio de tricromaticidad y el hecho de que a los observadores normales se les llame habitualmente “tricrómatas”. Este principio resume el hecho de que las personas con visión del color normal solo precisan tres primarios para obtener, mediante mezcla aditiva, todas las tonalidades perceptibles. Es decir, son tricrómatas (Lillo, 1993, cap. 7).

5. Transmisión de la Señal Visual: Sensaciones y Mecanismos Oponentes

El segundo nivel de procesamiento en la codificación del color se basa en la existencia de sensaciones oponentes. Es importante resaltar que las teorías que defienden la existencia de este nivel en la percepción del color no niegan la del primero, sino que proponen en qué

forma continuaría el procesamiento a partir de la información obtenida por los fotorreceptores. Hay dos formas, no antagónicas, de entender este nivel. La primera de ellas fue inicialmente propuesta por Ewald Hering (1878, citado por Mollon, 2003), fundador de la Teoría de Procesos Oponentes. Desde esta perspectiva, la percepción del color se explicaría por la existencia de sensaciones incompatibles. Experimentar algunas sensaciones a la vez es posible (rojo-amarillo, azul-rojo), pero no lo es experimentar otras (amarillo-azul, rojo-verde). Existiría un mecanismo que opone la experiencia de azul a la de amarillo y otro que haría lo propio con las de rojo y verde. Además, estos mecanismos se complementarían con un mecanismo acromático que opondría las sensaciones de claro y oscuro.

La segunda forma de entender este nivel (Hurvich, 1981; Lillo, Collado, Del Valle, & Sánchez López, 1995) se centraría en el tipo de información buscada en la estimulación para producir las sensaciones perceptivas que finalmente experimenta el observador. Esto es, el estudio del funcionamiento de los mecanismos oponentes analizaría cómo se pueden detectar ciertas características estimulares que se relacionan con las variaciones en la reflectancia de las superficies. La relación entre las características buscadas y el funcionamiento de los mecanismos oponentes se puede especificar de la siguiente forma:

1. Mecanismo acromático o claro-oscuro. Buscaría informar sobre la cantidad relativa de luz (muchas o pocas) reflejada por una superficie. Por tanto, proporcionaría información relacionada con la reflectancia de las superficies. Este mecanismo tendría dos fases funcionales:
 - A. Evaluación de las cantidades de luz que proceden de distintas superficies. Para ello computa la cantidad total de luz, sumando la detectada por los conos L y M (también contribuyen los conos S, pero en menor medida, y los bastones en condiciones mesópicas y escotópicas).
 - B. Comparación de las mediciones efectuadas. Se efectuaría una comparación de las superficies con una iluminación aparente similar. Si el SVH detectase variaciones en la iluminación de una escena, los cálculos (comparaciones)

realizados por el sistema se centrarían en cada una de las partes iluminadas en forma similar.

2. Mecanismo amarillo-azul. Respondería al predominio relativo de energía en una porción específica del espectro. Produciría un tipo de respuesta cuando el predominio detectado fuese en las longitudes de onda corta (azul) y otro cuando se da en las largas (amarillo).
3. Mecanismo rojo-verde. Respondería al predominio de energía en porciones específicas del espectro. Produciría un tipo de respuesta ante las longitudes de onda medias (verde) o en los extremos corto y largo del espectro (rojo, 400 nm y 700 nm). La presencia de rojo en ambos extremos del espectro puede resultar contraintuitiva, pues, generalmente, a uno de estos extremos se le denomina violeta (400 nm) y a otro rojo (700 nm). Sin embargo, el componente rojo está presente en ambos, en el primero de manera más débil, mezclado con azul, y en el segundo de manera más fuerte, mezclado con amarillo.

Se han obtenido funciones que representan la magnitud de respuesta de los dos mecanismos cromáticos ante las diferentes longitudes de onda. Las de uso más común datan de los años 50 (Hurvich & Jameson, 1957; D. Jameson & Hurvich, 1955). Se obtuvieron mediante la anulación (o cancelación) de complementarios. Los complementarios son estímulos cuya mezcla en las proporciones adecuadas produce experiencias acromáticas. La magnitud de respuesta de un mecanismo oponente ante cada longitud de onda se estableció en función de la cantidad de complementario requerida para anular una sensación cromática básica (rojo o verde, azul o amarillo). Por ejemplo, se presentaba una luz de color verde-amarillenta y se proyectaba luz monocromática azul sobre la misma hasta que desaparecía la sensación amarillenta.

Dado que los fotorreceptores retinianos y los mecanismos oponentes se relacionan con la percepción del color a dos niveles diferentes, y dado que se dispone de mediciones psicofísicas para cada uno de ellos, es fácil deducir ecuaciones que permitan pasar de uno a

otro. Algunos modelos que se han mostrado consistentes con la experiencia perceptiva proponen que la percepción del color en humanos se basa en un mecanismo rojo-verde que compara la suma de las respuestas de los conos S y L (S+L) con las de los conos M, mientras el mecanismo amarillo-azul compara la suma de las respuestas de los conos S y M (S+M) con las de los conos L (Schmidt, Neitz, & Neitz, 2014). Uno de estos modelos es el *multistage model* (modelo de varias etapas) propuesto por De Valois y De Valois (1993), que incorpora la rotación de los ejes cromáticos. Los autores sugieren dos modelizaciones, que difieren en el tipo de interacción entre campos receptivos e inputs en las células ganglionares bipolares y enanas: campos receptivos indiscriminados (inputs provenientes de los conos L, M y S) o campos receptores discretos, específicos a un tipo de cono (las células receptoras de L reciben input antagonista solo de M, y viceversa). A continuación se presentan las ecuaciones para ambas versiones [indiscriminada, ecuaciones (4) y (5); discreta, ecuaciones (6) y (7)]:

$$RG = 90L - 115M + 25S \quad (4)$$

$$YB = -130L + 95M + 35S \quad (5)$$

$$RG = 90L - 115M + 30S \quad (6)$$

$$YB = -130L + 95M + 30S \quad (7)$$

donde L , M y S representan los valores de excitación relativa de los tres tipos de conos utilizando los fundamentales de V. C. Smith y Pokorny (1975; para una descripción detallada del procedimiento, véase De Valois y De Valois, 1993).

iii. Medición del Color: Colorimetría. Espacios y Diagramas de Cromaticidad

1. Espacios y Diagramas de Colores

Como indicábamos en el [apartado 2.ii.3](#), la CIE ha desarrollado una serie de dimensiones (por ejemplo L^* , véase definición en [apartado 2.iii.4](#)) que guardan una correspondencia no perfecta con las dimensiones perceptivas (por ejemplo, la claridad, véase definición en [apartado 2.ii.3](#)). Es importante recalcar que ninguna de las dimensiones de la CIE existentes en la actualidad es totalmente adecuada. Esto es, ninguna permite mediciones que se correspondan perfectamente con la percepción del color (por ejemplo, aunque sea

cierto que la claridad percibida tiende a incrementarse con el valor de L^* , estímulos similares en L^* pueden percibirse con claridades algo diferentes).

Las dimensiones propuestas por la CIE permiten establecer “espacios” y “diagramas” (mapas) de color. Estos no serían otra cosa que representaciones tridimensionales (espacios) o bidimensionales (diagramas) de los colores. En los espacios y diagramas más evolucionados las distancias representadas guardarían correspondencia con las distancias (diferencias) experimentadas entre los colores. Los espacios son tridimensionales, pues representan tres dimensiones relacionadas bien con la cantidad de cada uno de los tres primarios necesaria para igualar cualquier color (espacios RGB o XYZ), bien, aunque de forma imperfecta, con las tres dimensiones perceptivas más importantes: tono, saturación y brillo/claridad (espacios CIELUV o CIELAB). En los diagramas, los espacios tridimensionales se proyectan en un plano bidimensional y se prescinde de dar información relacionada con el brillo/claridad. A continuación se efectuará una breve descripción de los principales espacios propuestos por la CIE y sus antecedentes (para una descripción más detallada véase Kaiser & Boynton, 1996, Ap. 1; R. W. G. Hunt & Pointer, 2011, cap. 3).

Los primeros intentos en la elaboración de mapas de colores se deben a Newton y Maxwell (Wasserman, 1978). Estos primeros diagramas consisten en un círculo cuyo perímetro representa las diferentes tonalidades en el mismo orden en el aparecen en el arco iris. Además, entre las posiciones correspondientes al violeta y al rojo, se representan los “tonos extraespectrales”. Esto es, a aquellos que no se pueden experimentar ante estímulos monocromáticos sino que requieren mezclar al menos dos longitudes de onda (se ven morados). A pesar de que a nivel cualitativo el círculo de colores permite realizar descripciones adecuadas, no permite hacer ningún tipo de predicción (ni cuantitativa ni cualitativa) relacionada con la mezcla aditiva de colores. Por ello fue necesario sustituir estos primeros mapas de colores por los espacios y diagramas que serán descritos a continuación.

Los primeros espacios desarrollados por la CIE (R. W. G. Hunt & Pointer, 2011, cap. 3; Wyszecki & Stiles, 1982, cap. 3) pueden denominarse espacios RGB porque: (1) Se basaron en el principio de tricromaticidad y (2) Utilizaban tres primarios: Un rojo (R, de *red*

en inglés), un verde (G, de *green* en inglés) y un azul (B, de *blue* en inglés). Como indicábamos en el [apartado 2.ii.4](#) el principio de tricromaticidad establece que las personas con visión del color normal solo precisan tres primarios para obtener, mediante mezcla aditiva, todas las tonalidades perceptibles. Para que se aplique el principio, tales primarios deben ser tres colores ortogonales (el tono de cualquiera de ellos no podría obtenerse mediante mezcla de los otros dos). En cualquier espacio RGB la posición de un color se define en función de las cantidades de los primarios precisas para producirlo. Por ejemplo, en el actualmente empleado por Microsoft las coordenadas que definen el blanco son $R=G=B=255$.

El principal problema de los espacios RGB es que obligan a utilizar valores negativos para definir algunos colores. Esto es, aunque sea una afirmación frecuente, no es cierto que la mezcla aditiva permita crear todos los colores (aunque sí todos los tonos) mediante mezcla de tres primarios. Por ejemplo, el color con el que se perciben algunos estímulos monocromáticos (energía en una sola longitud onda) no se puede reproducir exactamente mediante mezcla de dos o más primarios. Pongamos un ejemplo para aclarar mejor el hecho al que nos estamos refiriendo y sus consecuencias en la especificación de colores.

Uno de los espacios RGB de la CIE (para una descripción más detallada véase Capilla & Luque, 2002; R. W. G. Hunt & Pointer, 2011, cap. 3; Kaiser & Boynton, 1996, Ap. 1; Wyszecki & Stiles, 1982, cap. 3) utiliza como primarios tres estímulos monocromáticos: Un rojo ($R=700\text{ nm}$), un verde ($G=546,1\text{ nm}$) y un azul ($B=435,8\text{ nm}$). Partiendo de ellos, si se intenta igualar mediante mezcla aditiva el color experimentado ante una luz de 490 nm (un verde-azulado) se debería hacer lo siguiente: (1) Mezclar ciertas cantidades² de verde ($G=57$) y azul ($B=83$). Tal mezcla produciría un color del mismo tono que el azul que queremos crear, pero más saturado. (2) Añadir cierta cantidad del tercer primario ($R=-58$) sobre la luz de 490 nm para desaturarla. Por ello, los tres valores que definirían este color (sus “valores

²Asumiendo que 100 unidades de G o B producen respuestas de los conos equivalentes a la mostrada por la ordenada en la Figura 4, y que 100 unidades de R producen respuestas de los conos iguales a 100 veces las ordenadas.

triestímulo”) serían: $R=-58$, $G=57$ y $B=83$. Obsérvese el signo negativo correspondiente al valor triestímulo del primario rojo.

2. Espacio de Color CIE 1931 XYZ

Para evitar los problemas derivados de utilizar valores negativos en la especificación de colores, la CIE (1932) creó el espacio CIE 1931 XYZ, que emplea tres primarios imaginarios mediante cuya mezcla aditiva sí es posible obtener todos los colores reales. La importancia de este espacio es fácil de comprender si se considera que: (1) todos los espacios que se usan en la actualidad (R. W. G. Hunt & Pointer, 2011) son transformaciones del viejo espacio CIE 1931 XYZ. (2) Todas las mediciones colorimétricas actuales se efectúan en términos de X , Y y Z (valores triestímulo) que posteriormente se transforman para proporcionar información en función de las dimensiones colorimétricas más actuales.

Para crear el espacio CIE 1931 XYZ se utilizaron dos presupuestos: (1) las estimulaciones equienergéticas (misma cantidad de energía en todas las longitudes de onda) debían producir el siguiente resultado: $X=Y=Z$; (2) la función espectral correspondiente a Y debía ser idéntica a la FEE correspondiente a 2° de ángulo visual [$V(\lambda)$, propuesta por la CIE en 1924 y utilizada por los aparatos fotométricos para ponderar la eficacia relativa de las distintas longitudes de onda visibles].

3. Diagrama de Cromaticidad CIE 1931 xy

El diagrama de cromaticidad CIE 1931 xy es una proyección bidimensional del espacio de color CIE 1931 XYZ. Consiguientemente, mientras el espacio indica las cantidades de X , Y y Z precisas para especificar un color, el diagrama de cromaticidad informa sobre las cantidades relativas (proporciones) que permiten alcanzar este resultado, pero a costa de perder la información sobre su intensidad (luminancia). Por ejemplo, podría suceder que las cantidades que permitiesen crear el blanco utilizado por un monitor fuesen $X=Y=Z=100$. En tal caso las proporciones utilizadas serían $x=y=z=0,33$. Obviamente, para calcular las proporciones solo se debe dividir el valor tricromático correspondiente (p. ej. X) por la suma

de los tres valores tricromáticos o triestímulo ($X+Y+Z$). Una de las ventajas de trabajar con proporciones es que solo es necesario indicar dos de ellas (por convención x e y) para especificar un color, ya que la tercera es deducible si se conocen las dos anteriores ($z = 1 - (x + y)$). Gracias a ello, y como muestra la Figura 5, los colores pueden representarse en una superficie gráfica bidimensional (un diagrama de cromaticidad, o, si se prefiere, un mapa de colores). Describamos las principales características del diagrama de cromaticidad CIE 1931 xy .

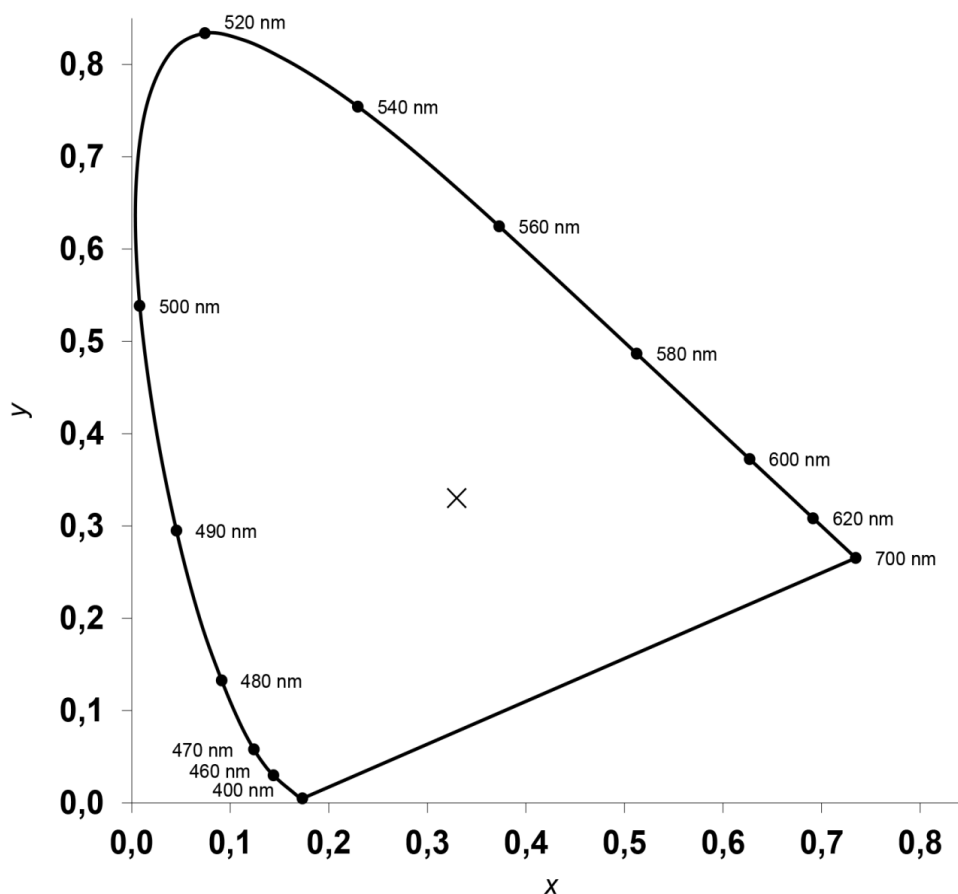


Figura 5. Diagrama CIE 1931 xy . En la porción curva del diagrama se representan los estímulos monocromáticos [valores tabulados en R. W. G. Hunt y Pointer (2011, Apéndice 4)]. La parte recta del perímetro corresponde a estimulaciones formadas por la mezcla aditiva de los extremos del espectro visible y se denomina línea de los morados o de colores no espectrales. El punto central del diagrama ($x=y=0,33$) representa la cromaticidad de los estímulos equienergéticos y sus metámeros, que tienden a percibirse acromáticos.

En el diagrama de cromaticidad presentado en la Figura 5, los estímulos monocromáticos se representan en la porción curva del perímetro (se indican algunas longitudes de onda). Son los estímulos que tienden a percibirse más saturados. La parte recta del perímetro corresponde a estimulaciones que también tienden a percibirse muy saturadas pero que no son monocromáticas, sino que están formadas por la mezcla aditiva de los extremos del espectro visible. Dicho segmento se denomina línea de los morados o de colores no espectrales. El punto central del diagrama ($x=y=0,33$) representa los estímulos equienergéticos que tienden a percibirse acromáticos, es decir, blancos, grises o negros. Es importante recordar que en un diagrama de cromaticidad cada punto no representa un color (p. ej. un blanco), sino un conjunto de colores (p. ej. algunos blancos, grises y negros). Que sea así deriva de que los diagramas no informan sobre la intensidad estimular (y por tanto, sobre el brillo/claridad de los colores).

El diagrama CIE 1931 xy (CIE, 1932) permite representar gráficamente algunas características relacionadas con la mezcla aditiva de colores. Veamos cómo:

- *Línea de mezcla.* Cuando se mezclan aditivamente dos colores, el resultado siempre se representa mediante uno de los puntos del segmento que los une. Este hecho sirve para ilustrar la existencia de dos tipos especiales de estímulos:
 - Metámeros: Estímulos físicamente diferentes pero perceptivamente idénticos. Un mismo estímulo (un punto en el diagrama) se incluye en infinitas rectas y, por tanto, puede ser el resultado de infinitas mezclas de colores. Tales mezclas serían físicamente diferentes pero darían lugar a la percepción del mismo color.
 - Complementarios: como indicábamos en el [apartado 2.ii.5](#), son estímulos que se perciben con tonalidades cuya mezcla produce un color acromático. Los estímulos situados en radios opuestos de un mismo diámetro del diagrama producen, al mezclarse en las cantidades adecuadas, un color representable en el punto acromático.

- *Polígono de colores posibles.* Todos los resultados posibles mediante mezcla aditiva de tres o más colores se representan en el polígono definido por los primarios utilizados. Este hecho es de amplia utilización cuando se desea, por ejemplo, comparar la gama de colores generados en distintos tipos de monitores de ordenador. Dependiendo de los primarios empleados por ellos se podrán conseguir más o menos colores.

Además de ser útil en relación con la mezcla aditiva, el diagrama CIE 1931 xy (CIE, 1932) también permite especificar determinados parámetros psicofísicos (longitud de onda dominante, pureza), que guardan alta relación (aunque no perfecta, recordemos la “ruptura del principio de suficiencia energética cualitativa” mencionada en el [apartado 2.ii.3](#)) con algunos parámetros perceptivos (tono y saturación). Veamos cómo:

- *Longitud de onda dominante (λ_D).* Este parámetro deriva de la línea de mezcla y se puede especificar de la siguiente forma: Cualquier estímulo representable en un radio del diagrama de cromaticidad (línea que va desde el punto acromático al perímetro del diagrama) se puede metamerizar mezclando luz acromática y el estímulo monocromático representado en el perímetro del diagrama. La longitud de onda correspondiente a tal estímulo será, por tanto, la longitud de onda dominante (λ_D) de todos los estímulos incluidos en tal radio (véase Figura 6). Los estímulos similares en λ_D tenderán a percibirse con el mismo tono.

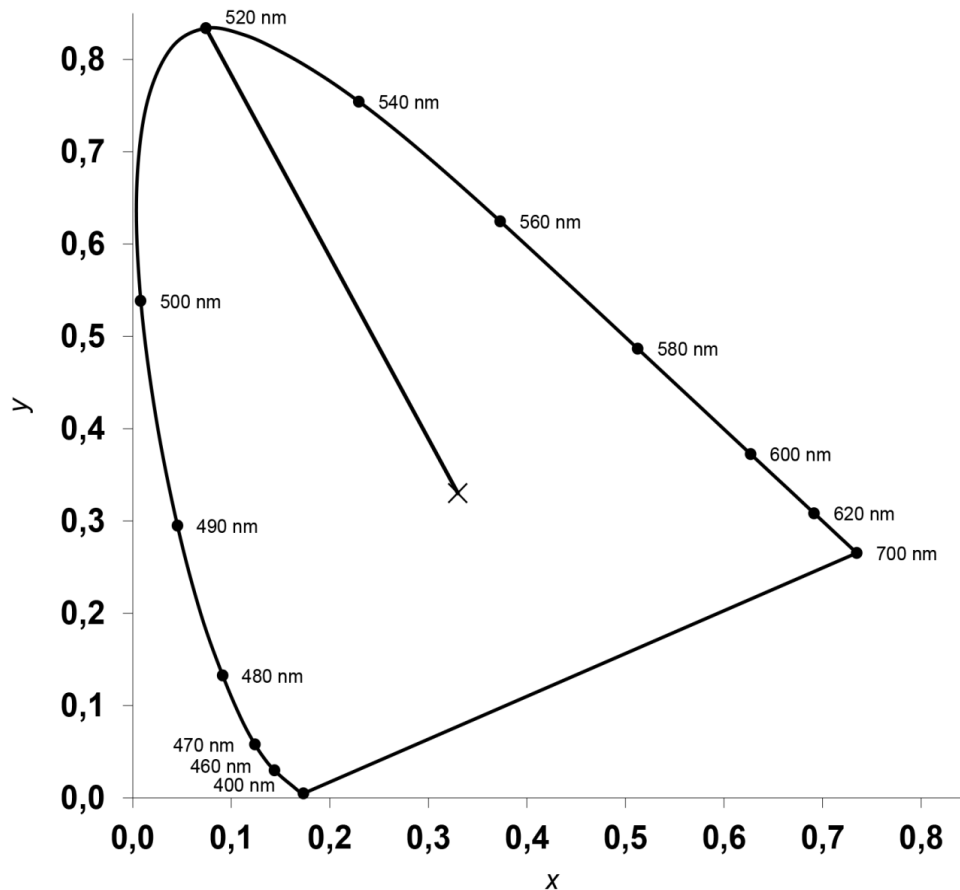


Figura 6. Longitud de onda dominante en el diagrama CIE 1931 xy. Cualquier estímulo representable en un radio del diagrama de cromaticidad (línea que va desde el punto acromático al perímetro del diagrama) se puede metamerizar mezclando luz acromática y el estímulo monocromático representado en el perímetro del diagrama. La longitud de onda correspondiente a tal estímulo será, por tanto, la longitud de onda dominante (λ_D) de todos los estímulos incluidos en tal radio. El perímetro del diagrama corresponde con los valores tabulados en R. W. G. Hunt y Pointer (2011, Apéndice 4).

- *Pureza de excitación o psicofísica.* Dentro de un radio del diagrama de cromaticidad se da una gradación en la pureza de los estímulos representados. En un extremo está el punto acromático y, por tanto, el que permite representar a los estímulos físicamente más impuros, ya que podrían acumular energía en todas las longitudes de onda visibles. En el otro extremo se ubica el estímulo más puro, ya que la energía solo se acumula en una

longitud de onda (o en dos, para los radios que terminan en la línea de los morados). Lógicamente, las posiciones intermedias corresponderán a niveles intermedios de pureza. En general, el incremento en los niveles de pureza tiende a incrementar la saturación percibida.

4. Espacios CIELUV Y CIELAB

Como hemos visto, el viejo espacio CIE 1931 XYZ (y su correspondiente diagrama de cromaticidad CIE 1931 xy) presenta numerosos aspectos positivos. Sin embargo, desde muy pronto la CIE fue consciente de que este espacio tenía un grave inconveniente: las distancias representadas en él distan de ajustarse adecuadamente a las distancias realmente percibidas entre colores (MacAdam, 1942, citado por Smith & Pokorny, 2003). Esto es, una misma distancia (p. ej. $\Delta E = 2$) puede corresponder, en función de la zona del espacio en la que nos encontremos, a una variación entre colores imperceptible o a una que se aprecie con facilidad. Tal variabilidad no es aceptable en un importante número de aplicaciones. Por ejemplo, en la industria automovilística se desea saber cuánto puede “equivocarse” la reproducción de un color antes de que el usuario medio advierta la diferencia entre el color deseado y el conseguido. Por ello, se desea que una especificación sea constante en términos de distancias entre colores, es decir, que p. ej. $\Delta E = 2$ siempre corresponda a una misma variación percibida.

En 1976 la CIE estableció dos espacios (el CIELUV y CIELAB) en los que las distancias representadas se parecen mucho más a las percibidas que en el viejo espacio CIE 1931 XYZ (CIE, 1978b; R. W. G. Hunt & Pointer, 2011, cap. 3). Ambos espacios son transformaciones matemáticas de CIE 1931 XYZ, pero dado que el espacio CIELUV es mucho más adecuado para predecir los colores que confunden los dicrómatas, y puesto que este tipo de observador es muy relevante en nuestra investigación, será de uso preferente en la parte empírica de esta tesis.

Los dos espacios desarrollados por la CIE (1978b) permiten medir la distancia perceptiva (ΔE^*) entre dos estímulos mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*)^2 + (\Delta H^*)^2} \quad (8)$$

donde ΔL^* , ΔC^* y ΔH^* serían, respectivamente, distancias colorimétricas que estimarían la diferencia en claridad, croma y tono de los dos colores considerados.

La primera variable de la ecuación (11), L^* , se utiliza para estimar la claridad (L^* , es la inicial de *Lightness*, claridad en inglés). Se computa utilizando la siguiente ecuación:

$$L^* = 116(Y / Y_n)^{1/3} - 16 \quad (9)$$

donde Y sería la luminancia del estímulo considerado e Y_n la del blanco de referencia.

Las otras dos variables del espacio CIELUV (CIE, 1978b), C^* y H^* , requieren el cálculo de una serie de variables intermedias. Las dos primeras, u' y v' , son transformaciones de las dos proporciones tricromáticas, x e y , utilizadas en el viejo diagrama de cromaticidad CIE 1931 xyy , por ello, permiten confeccionar un nuevo diagrama de cromaticidad, el CIE 1976 $u'v'$ (véase la Figura 7). Este diagrama es mucho más adecuado respecto a cómo representa la distancia percibida entre estímulos.

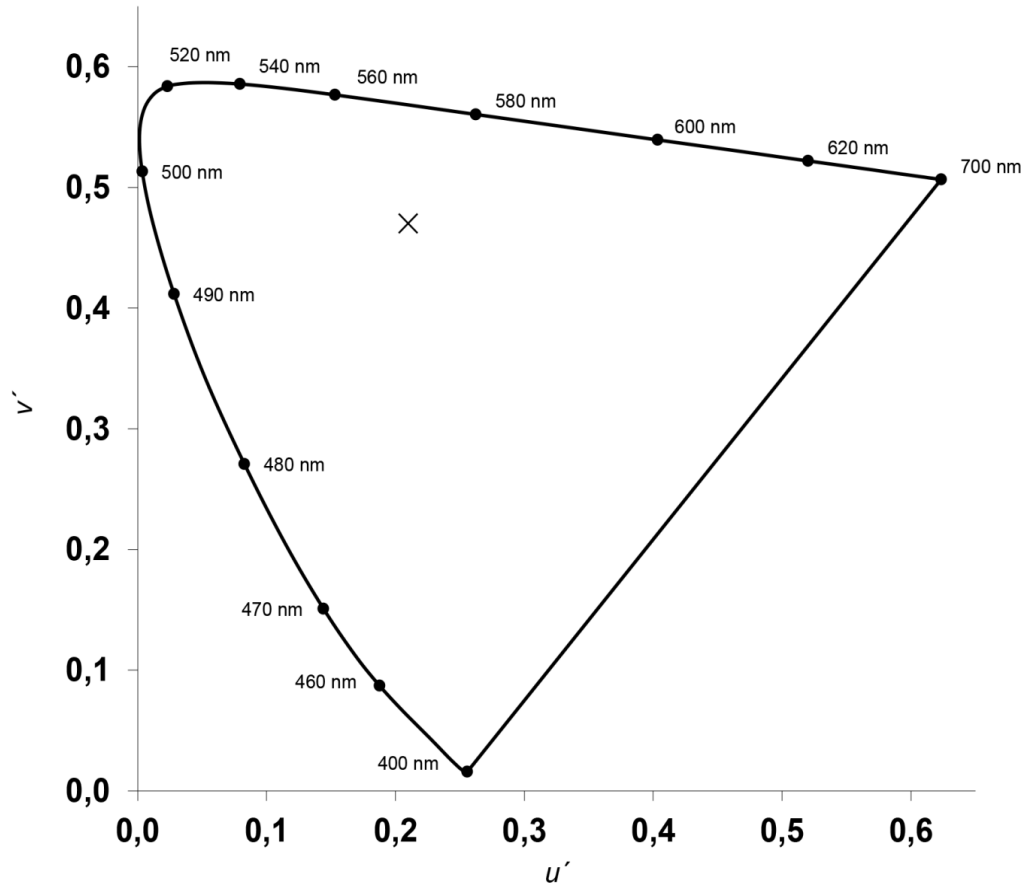


Figura 7. Diagrama de cromaticidad *CIE 1976* $u'v'$. En la porción curva del diagrama se representan los estímulos monocromáticos [valores tabulados en R. W. G. Hunt y Pointer (2011, Apéndice 4)]. La parte recta del perímetro corresponde a estimulaciones formadas por la mezcla aditiva de los extremos del espectro visible y se denomina línea de los morados o de colores no espectrales. El punto central del diagrama ($u' = 0,21$; $v' = 0,47$) representa la cromaticidad de los estímulos equienergéticos y sus metámeros, que tienden a percibirse acromáticos.

Las ecuaciones para transformar las coordenadas x, y en coordenadas u', v' son las siguientes (R. W. G. Hunt & Pointer, 2011, cap. 3):

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (10)$$

$$v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \quad (11)$$

El uso de u' y v' permite especificar un par de nuevas variables psicofísicas h_{uv} (ángulo de tono o ángulo cromático de un estímulo) y s_{uv} (saturación de un estímulo), utilizando las dos siguientes ecuaciones:

$$h_{uv} = \arctan[(v' - v'_n)/(u' - u'_n)] \quad (12)$$

$$s_{uv} = 13 \sqrt{[(u' - u'_n)^2 + (v' - v'_n)^2]} \quad (13)$$

A efectos de identificación de estímulos es indiferente emplear h_{uv} o λ_D , pues todos los estímulos situados en un mismo radio en el diagrama son iguales respecto a ambas variables. Sin embargo, las diferencias en h_{uv} se aproximan más a las diferencias percibidas. En cuanto a la variable s_{uv} , no se ajusta a lo que en nomenclatura psicológica se suele llamar saturación, sino que se limita a informar sobre la distancia existente en el diagrama entre la posición del estímulo de interés y el blanco de referencia. Por tanto, es una variable muy similar a la pureza de excitación (véase apartado 2.iii.3). Como veremos, lo que suele llamarse saturación en la nomenclatura psicológica está muy relacionado con la variable CIE croma (C^*).

Las siguientes variables intermedias, u^* y v^* , son las que dan nombre al espacio.

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n) \quad (14)$$

$$v^* = 13L^*(v' - v'_n) \quad (15)$$

donde u'_n y v'_n son los valores u' , v' para el blanco de referencia.

A partir de estas variables podemos calcular tanto C^* como la propia diferencia de estímulos mediante las siguientes ecuaciones:

$$C_{uv}^* = (u^{*2} + v^{*2})^{1/2} = L^* s_{uv} \quad (16)$$

$$\Delta E_{uv}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2} \quad (17)$$

Conocidos, para un par de estímulos, los valores de ΔE^* , ΔL^* y ΔC^* , el valor de ΔH^* se puede computar despejando como muestra la siguiente ecuación:

$$\Delta H_{uv}^* = \sqrt{(\Delta E_{uv}^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C_{uv}^*)^2} \quad (18)$$

En relación al espacio CIELAB, las variables intermedias que dan nombre al espacio se calculan de la manera siguiente:

$$a^* = 500 \left[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3} \right] \quad (19)$$

$$b^* = 200 \left[(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3} \right] \quad (20)$$

donde X_n , Y_n y Z_n son los valores de X , Y y Z para el blanco de referencia; y donde cuando alguna de las ratios X/X_n , Y/Y_n y Z/Z_n es igual o menor a 0,008856, es sustituido en la fórmula por:

$$7.787F + 16/116 \quad (21)$$

donde F sería X/X_n , Y/Y_n o Z/Z_n , el que correspondiera en cada caso.

Los correlatos de tono y croma en el espacio CIELAB se computan en forma análoga a como se hacía en el espacio CIELUV:

$$h_{ab} = \arctan(a^*/b^*) \quad (22)$$

$$C_{ab}^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (23)$$

Los espacios CIELUV y CIELAB solo permiten comparar diferencias entre superficies de dimensiones relativas reducidas, contempladas sobre ciertos fondos y por observadores adaptados fotópicamente a estimulaciones no muy distintas a las proporcionadas por iluminaciones comunes. Para muestras relativamente grandes, los valores triestímulo convencionales (X , Y , Z) se deben sustituir por los relacionados con el observador CIE de 10° (véase apartado 2.ii.2), esto es, por X_{10} , Y_{10} y Z_{10} . Todas las variables obtenidas a partir de ellos incorporan el subíndice 10. Por ejemplo, L^*_{10} , $h_{uv,10}$, etc.

5. Limitaciones de los Espacios CIELUV y CIELAB

Los espacios CIELUV y CIELAB, permiten especificar las diferencias entre colores en forma mucho más adecuada que el viejo espacio CIE 1931 XYZ, pero distan de hacerlo en forma plenamente adecuada. En las últimas décadas se han realizado serios esfuerzos para mejorar la forma en cómo se especifica la diferencia de color experimentada entre dos estímulos (ΔE^*), proponiendo fórmulas como CMC(l:c), ΔE^*_{CIE94} o la reciente CIEDE2000 (Melgosa, Huertas, & Berns, 2004), todas ellas basadas en el espacio CIELAB.

Otra de las limitaciones de los espacios de color homologados por la CIE en 1976 (CIELUV y CIELAB) es que ninguna de las dimensiones incluidas en ellos guarda una relación perfecta con las tres dimensiones perceptivas más comúnmente utilizadas en la descripción de los colores. Debido a ello, y para incorporar nuevas dimensiones colorimétricas relacionadas con otras dimensiones perceptivas, la CIE ha desarrollado en las dos últimas décadas una serie de modelos que se identifican mediante las siglas “CAM”, iniciales de la expresión inglesa “*Color Appearance Model*” (modelo de apariencia del color): CIECAM97s y CIECAM02.

Dado que ni las diferencias de color ni los modelos CIECAM han sido un tema central en los estudios empíricos de esta tesis, no entraremos en detalle sobre ellos. Para una descripción detallada pueden consultarse R. W. G. Hunt y Pointer (2011) y Fairchild (2013) y para algunas correcciones de los mismos, Jiang et al. (2015).

Capítulo 3. Alteraciones de la Percepción del Color

i. Tipos de Alteraciones de la Visión del Color

Hasta ahora hemos descrito las características de la estimulación que llega a la retina, los mecanismos que la procesan en tricrómatas comunes y los distintos espacios, sistemas y dimensiones propuestos por la colorimetría para describir las respuestas del SVH ante tal estimulación. Ahora describiremos las alteraciones que provocan que algunos individuos tengan una percepción del color diferente de los observadores comunes. A estos individuos se les ha denominado tradicionalmente “ciegos a los colores”. Sin embargo, sería más adecuado decir que tienen deficiencias en la percepción del color, pues en la mayoría de los casos lo que sucede es que hay una reducción en la discriminación de colores, no una pérdida completa de la misma.

El reconocimiento histórico de las deficiencias de la visión del color llegó muy tarde, posiblemente por dos motivos: por un lado debido a la imprecisión en la acuñación y uso de las etiquetas de color, y por otro a la dificultad que supone que los individuos con alteraciones echen en falta algo de lo que nunca han disfrutado (Mollon, 2003). En la literatura podemos encontrar menciones y descripciones de individuos con dificultades para distinguir los colores (Boyle, 1688; Huddart, 1777; Newton, 1675/1757; citados por Mollon, 2003), pero los primeros comentarios analíticos sobre las alteraciones de la visión del color no llegarían hasta Dalton (1798).

Centrémonos en primer lugar en el origen de las alteraciones. Podemos clasificarlas en alteraciones de origen genético y alteraciones adquiridas. Sin embargo, a causa de la gran variabilidad de estas últimas, el interés de nuestra investigación se centrará en las alteraciones con un origen genético (para una descripción de las mismas véase Birch, 2001, cap. 9 o Grützner, 1972).

Los defectos genéticos de la visión del color son una condición hereditaria y permanente en la que se dan diferencias respecto a la igualación y discriminación del color.

El origen de tales alteraciones se halla en mutaciones puntuales, reordenamientos y supresiones de los genes de opsina que determinan la estructura y función de los fotopigmentos de los conos visuales (Neitz & Neitz, 2011; V. C. Smith & Pokorny, 2003). Tales alteraciones en los fotorreceptores retinianos (primer nivel de procesamiento del color), inevitablemente producen alteraciones en el funcionamiento de los mecanismos oponentes (segundo nivel de procesamiento), pues su función es procesar la información recibida del primer nivel.

Las alteraciones de origen genético se clasifican en función del número mínimo de primarios que necesitan los individuos que las padecen para igualar, mediante mezcla aditiva, cualquier tono (Lillo & Moreira, 2004). A este respecto indicábamos que, siguiendo el principio de tricromaticidad (véase [apartado 2.ii.4](#), Lillo, 1993, cap. 7), los tricrómatas comunes requieren tres primarios. Las alteraciones serán más importantes cuanto más nos alejemos de este número, es decir, cuantos menos primarios sean necesarios para efectuar una mezcla metamérica.

El grupo de alteraciones de mayor gravedad lo constituyen los monocromatismos: los monocrómatas solo requieren un (mono-) primario para igualar, mediante mezcla aditiva, la sensación que experimentan ante cualquier estimulación. Los monocromatismos se subdividen a su vez en dos tipos, monocromatismo por ausencia de conos y monocromatismo monocónico.

El primer tipo de alteración es el monocromatismo más común (Birch, 2001, cap. 4; R. W. G. Hunt & Pointer, 2011, cap. 1). Aunque se denomine monocromatismo por ausencia de conos, los tres tipos de conos están anatómicamente presentes. El problema en estos individuos es que los conos no responden, carecen de funcionalidad. Esto hace que no sea posible la discriminación del color, por lo que en este caso sí podría hablarse de “ceguera a los colores”: los monocrómatas por ausencia de conos solo perciben en la estimulación variaciones en intensidad. Su respuesta es función de la intensidad presentada y la sensibilidad de su sistema visual a las distintas longitudes de onda. Los únicos fotorreceptores operativos para ellos son los bastones, situados fuera de la fovea. Al ser ésta la región de la

retina que permite un mayor grado de agudeza, los monocromáticos por ausencia de conos tienen una capacidad para apreciar detalles muy baja. Su agudeza visual es de entre 6/60 y 6/36, lo que les hace estar próximos al límite legal de la ceguera. Además, dado que los bastones funcionan habitualmente en condiciones de iluminación bajas o escotópicas, sufren fotofobia y deben utilizar gafas ahumadas que reduzcan la cantidad de luz que llega a la retina para evitar deslumbramientos. También padecen nistagmo.

En el caso de los monocrómatas monocónicos, se da ausencia de funcionalidad en dos tipos de conos. Esta alteración es muy poco habitual (Birch, 2001, cap. 4; R. W. G. Hunt & Pointer, 2011, cap. 1) y generalmente los conos funcionales son conos S (o tritaconos). Tanto en condiciones de iluminación fotópicas, donde solo funcionan los conos del tipo sano, como escotópicas, donde solo funcionan los bastones, son “ciegos a los colores”, pues, como en el caso de los monocrómatas por ausencia de conos, su respuesta es función de la intensidad presentada y la sensibilidad a las distintas longitudes de onda. Sin embargo en condiciones de iluminación mesópicas, en las que tanto los conos del tipo sano como los bastones están operativos, aparece una discriminación residual del color. Esto hace que a veces se les denomine acromáticos incompletos. Su agudeza visual presenta valores entre 6/9 y 6/24. En algunos monocrómatas monocónicos aparece una degeneración de la retina central que conduce a una disminución de la agudeza visual. Cuando es menor de 6/18 estos individuos sufren igualmente fotofobia y nistagmo.

El segundo grupo de alteraciones lo constituyen los dicromatismos: los dicrómatas solo requieren dos (di-) primarios para igualar, mediante mezcla aditiva, cualquier tono. La causa de los dicromatismos es que únicamente existen en la retina dos clases de receptores funcionales. Pueden establecerse tres categorías en función de qué tipo de cono es el afectado. De este modo existen individuos protanopes, deuteranopes y tritanopes.

Los dos primeros tipos de alteraciones, protanopia y deuteranopia, son las que producen mayores problemas cotidianos, teniendo además una incidencia relativamente alta (1% de los varones para cada tipo), por lo que son el centro de nuestra investigación. Realizaremos una extensa descripción de estos dicromatismos en el [apartado 3.ii](#).

En relación a la tritanopia, su tasa de aparición es muy baja, situándose en 0,002 % para varones y 0,001 para mujeres (R. W. G. Hunt & Pointer, 2011, cap. 1). El fotopigmento de los conos S (o tritaconos) está ausente. Como consecuencia hay una grave reducción en la discriminación de los componentes azulados y amarillentos de los colores. Por otra parte, debido a la baja contribución de los conos S a la señal acromática (véase [apartado 2.ii.5](#)) en la tritanopia se da una visión acromática muy similar a la común (estando localizada la máxima eficiencia espectral en torno a 555 nm). La principal diferencia se concreta en una menor eficiencia espectral para las longitudes de onda comprendidas entre 460 y 500 nm (véase, por ejemplo, Pridmore 2014, Figura 4).

El tercer y último grupo de alteraciones se incluyen en el grupo de los tricromatismos. Al igual que los observadores comunes, los tricrómatas anómalos requieren tres (tri-) primarios para igualar, mediante mezcla aditiva, cualquier tonalidad percibida. Sin embargo, las proporciones empleadas son diferentes. No existe evidencia de tricromatismos anómalos hereditarios que afecten al cono S, únicamente a los conos L y M. Como en el caso de protanopes y deuteranopes, en los tricrómatas anómalos el problema deriva de la ausencia del fotopigmento L en protanómalos y M en deuteranómalos. Sin embargo, esta carencia se ve parcialmente compensada por la existencia de un fotopigmento M híbrido además del normal en protanómalos y un fotopigmento híbrido L además del normal en deuteranómalos (V. C. Smith & Pokorny, 2003). Los dos tipos de tricromatismos anómalos pueden a su vez clasificarse en simple o extremo, dependiendo de la magnitud de la diferencia espectral entre el fotopigmento híbrido y el común (Neitz & Neitz, 2011). Los tricrómatas anómalos disponen de funcionalidad en los dos mecanismos cromáticos, pero, aunque experimenten los cuatro tonos únicos, las estimulaciones que los provocan son algo diferentes. Las alteraciones de los mecanismos oponentes para protanómalos y deuteranómalos son de mayor magnitud en el rojo-verde que en el amarillo-azul.

En cuanto a la percepción de la claridad, protanómalos y deuteranómalos padecen alteraciones similares (aunque menores) a las que se describirán en el siguiente apartado (véase [apartado 3.ii](#)) para protanopes y deuteranopes, respectivamente. El grado en que la

percepción de la claridad esté alterada depende de la magnitud de la diferencia espectral entre el fotopigmento híbrido y el común, existiendo grandes diferencias individuales.

En relación a las anomalías relacionadas con los conos S, aunque como decíamos previamente no existe evidencia de que puedan ser hereditarias, sí es relativamente común padecer tritanomalía adquirida por envejecimiento a causa del amarillamiento del cristalino. En estos casos el problema se resuelve mediante una operación de cataratas (Lillo & Moreira, 2004). Esta alteración implica cierta reducción en la discriminación de los componentes azulados y amarillentos de los colores (Knoblauch et al., 1987; Verriest, 1963). En cuanto a la sensibilidad espectral, los cambios sufridos (reducción de sensibilidad ante longitudes de onda corta) son acordes a los cambios sufridos en la transmitancia espectral del cristalino (reducción de transmitancia ante dichas longitudes de onda, Sagawa & Takahashi, 2001), manteniéndose sin embargo la percepción de la luminosidad y la claridad más estable de lo esperable gracias a un mecanismo de compensación (Kraft & Werner, 1994; Lillo, Moreira, Pérez del Tío, Álvaro, & Durán, 2013). Como sucedía con los otros dos tipos de tricrómatas anómalos, estas alteraciones serán de menor gravedad y existirá gran variabilidad individual, en este caso en función del grado de opacidad del cristalino.

ii. Dicromatismos R-V

1. Características Perceptivo-Funcionales

La protanopia y la deuteranopia son los dos tipos de dicromatismo R-V (véase más adelante), y se incluyen en el grupo que tradicionalmente se ha conocido como daltonismos. El origen del término daltonismo se halla en uno de los primeros estudiosos de este tipo de alteraciones, John Dalton, quién además era deuteranope (D. M. Hunt, Dulai, Bowmaker, & Mollon, 1995). Ambas alteraciones se transmiten asociadas al sexo, pues el problema está localizado en el cromosoma X, y son recesivas (Botstein, 1986; Nathans, 1987, 1989; Nathans, Piantanida, Eddy, Shows, & Hogness, 1986; Neitz & Neitz, 2011; V. C. Smith & Pokorny, 2003). La prevalencia de ambas alteraciones es de un 1,14% de los varones y un 0,02% de las mujeres (Sharpe, Stockman, Jägle, & Nathans, 1999)). Los daltónicos dicrómatas tienen un fotopigmento incorrecto (repetido) en los conos L (en el caso de los

protanopes) o M (en el caso de los deuteranopes), lo que supone a efectos prácticos que únicamente poseen conos S, además de conos M (protanopes) o conos L (deuteranopes). Para ambos tipos de dicrómatas, aparece una grave reducción en la discriminación de los componentes rojizos y verdosos de los colores.

El estudio sistemático de las principales características psicofísicas relacionadas con las alteraciones heredadas de la visión del color puede remontarse a los clásicos estudios de Pitt (1935) y W. D. Wright (1946; 1952, véase Pridmore, 2014 para una descripción breve de trabajos posteriores relacionados, o Birch, 2001, cap. 4 para una descripción más detallada) y pueden sintetizarse de la siguiente manera:

- *Desplazamiento en la ubicación del máximo en la función de eficiencia espectral.* La longitud de onda de máxima sensibilidad, usualmente medida mediante fotometría heterocromática de fluctuación, es diferente a la común (V. C. Smith & Pokorny, 2003). Para los tricrómatas comunes se sitúa en 555 nm, mientras que para protanopes el máximo se sitúa en 540 nm (véase, por ejemplo, Pridmore, 2014, Figura 4), y hay una marcada disminución de la sensibilidad para las longitudes de onda largas (práctica ausencia de sensibilidad por encima de 630 nm). Este hecho se denomina “acortamiento del final rojizo del espectro”. En contraposición con lo que se acaba de comentar, en deuteranopes la máxima sensibilidad se sitúa en 560 nm (muy próxima a lo habitual, pero desplazada hacia la porción larga del espectro) y se ha encontrado una sensibilidad relativamente reducida para las longitudes de onda medio-cortas (Lillo & Moreira, 2005). Los desplazamientos en la sensibilidad espectral de protanopes y deuteranopes producen cambios en su percepción del contraste acromático.
- *Cambios en la percepción de la claridad.* El desplazamiento en las curvas de sensibilidad espectral de los dicrómatas produce, inevitablemente, alteraciones en la percepción de la claridad, aunque de distinto signo (véase, por ejemplo, Lillo & Moreira, 2005). Los protanopes, ante longitudes de onda menores de 550 nm (azulados), tienen una eficiencia espectral ligeramente mayor respecto a la de los observadores comunes, por lo que estas longitudes de onda se perciben más claras,

sucediendo lo contrario para las longitudes de onda más largas. Los cambios en la percepción de la claridad de los deuteranopes, además de ser menores, son de tipo inverso a los de los protanopes.

- *Reducción selectiva en la discriminación entre longitudes de onda.* Protanopes y deuteranopes tienen un tipo de alteración muy similar en su capacidad para discriminar entre longitudes de onda: la capacidad es máxima en las proximidades de 495-500 nm (longitud pseudoacromática, véase Pridmore, 2014, Figura 6) y no pueden distinguir cambios estimulares cualitativos en longitudes de onda mayores de 540 nm. Pitt (1935) estimó que el número de tonalidades espectrales distinguibles era próximo a 30 para protanopes y de 17 para deuteranopes, siendo de 150 para los tricrómatas comunes.
- *Alteraciones en el funcionamiento de los mecanismos oponentes cromáticos.* Dos de los tres mecanismos oponentes descritos en el [apartado 2.ii.5](#) se relacionan con la capacidad para discriminar entre longitudes de onda. El mecanismo menos afectado por la ausencia de proto o deuteranops es el amarillo-azul. Este resultado es predecible considerando que el funcionamiento de este mecanismo se basa en la comparación entre, por una parte, la energía detectada en la porción corta del espectro (respuesta en tritaconos) y, por otra, la detectada en la porción medio-larga gracias a la integración de las respuestas de proto y deuteranops. Una forma habitual de expresar esta oposición (véase, p. ej. Hurlbert & Ling, 2007 o Palmer & Schloss, 2010) es mediante la expresión:

$$\text{Azul-Amarillo} = S - (L + M) \quad (24)$$

donde S, L y M son, respectivamente, las respuestas en trita, proto y deuteranops (véase [apartado 2.ii.4](#)). Obviamente, la ausencia de uno de estos dos últimos tipos de cono no altera sustancialmente los resultados de la comparación (véase, por ejemplo, Pridmore, 2014 Figura 5), y, por ello, el funcionamiento del mecanismo amarillo-azul en protanopes y deuteranopes es muy similar al que se da en los tricrómatas comunes.

Es común utilizar la expresión “dicrómatas R-V” para referirse conjuntamente a protanopes y deuteranopes. La causa de este hecho es que durante mucho tiempo la concepción dominante en la comunidad científica fue la de asumir que estos dicrómatas carecían de actividad funcional en el mecanismo rojo-verde (p. ej. Graham & Hsia, 1958). Esta conclusión es lógica si se asume que lo que esencialmente hace este mecanismo es comparar las respuestas de protoconos y deuteranconos en la forma indicada en la siguiente expresión (véase, p. ej. Hurlbert & Ling, 2007 o Palmer & Schloss, 2010):

$$\text{Rojo-Verde} = L - M \quad (25)$$

Tal comparación, obviamente, carece de sentido cuando se carece de respuesta en uno de los dos tipos de cono y, por tanto, también parece lógico esperar la ausencia de funcionalidad de este mecanismo en los “dicrómatas R-V”. Por otra parte, sin embargo, desde hace mucho tiempo, distintos tipos de evidencia indican la posible existencia de actividad residual en el mecanismo rojo-verde.

Hace más de 100 años Willibald Nagel (1905), el creador del anomaloscopio que lleva su nombre, publicó un artículo con un título muy ilustrativo: *Dichromatische Fovea, Trichromatische Peripherie* (Fóvea dicrómata, Periferia tricrómata). Boynton y Scheibner (1967; Scheibner & Boynton, 1968) apoyaron esta idea demostrando que los dicrómatas solo lo son verdaderamente ante estimulaciones pequeñas, convirtiéndose en tricrómatas anómalos ante estimulaciones iguales o mayores a 3° de ángulo visual. Posteriores investigaciones han confirmado la existencia de actividad residual en el mecanismo R-V en muchos protanopes y deuteranopes protanopes y deuteranopes (Montag, 1994; Moreira et al., 2014; V. C. Smith & Pokorny, 1977; Wachtler, Dohrman, & Hertel, 2004; para una revisión véase Broackes, 2010). Aunque no exista en la actualidad acuerdo respecto al posible de la actividad residual, se han propuesto varias explicaciones sobre el origen de la actividad residual rojo-verde, tales como (1) influencia de los bastones (Montag & Boynton, 1987), ganancias y no linealidades aplicadas a las señales de los receptores (Wachtler et al., 2004) o (3) la influencia de aberraciones cromáticas (Forte, Blessing, Buzás, & Martin, 2006).

2. Metámeros y Líneas de Confusión en Dicrómatas

Como se indicó anteriormente (véase [apartado 2.iii](#)), los diagramas de cromaticidad se utilizan para predecir qué estímulos deben ser metámeros para un auténtico dicrómata R-V (pero no para un observador común). Más concretamente, en los diagramas CIE 1931 xy (CIE, 1932) y CIE 1976 $u'v'$ (CIE, 1978b) es posible trazar rectas (líneas pseudoisocromáticas) que incluyen estímulos que un daltónico dicrómata no debería ser capaz de distinguir (si están igualados en luminosidad), aunque sí pueda hacerlo un observador común. Nos referiremos a tales estímulos como estímulos pseudometámeros: físicamente diferentes y diferenciables por parte de los observadores comunes, pero indistinguibles para los daltónicos dicrómatas.

Cuando se utiliza un diagrama CIE, las líneas de confusión se definen a partir del punto de convergencia específico a cada tipo de dicrómata. En el diagrama CIE 1976 $u'v'$ (CIE, 1978b) para protanopes sus coordenadas son $u' = 0,656$ $v' = 0,502$; para deuteranopes $u' = -1,217$ $v' = 0,783$ (V. C. Smith & Pokorny, 1975). Los puntos de convergencia se sitúan fuera del diagrama porque se corresponden a estimulaciones imaginarias, ante las que solo respondería un tipo de cono. Este tipo de estimulación no existe, y dado que el diagrama representa estímulos reales, se sitúan fuera de él.

Los puntos de convergencia se estimaron inicialmente a partir de la media de zonas pseudoisocromáticas halladas para 6 dicrómatas (K. A. Jameson & Komarova, 2009; Pitt, 1935). Las diferencias en la densidad de pigmento en la mácula y la existencia de polimorfismos en los genes que codifican los fotopigmentos M y L producen variaciones individuales en la localización de los puntos de convergencia y en la forma de igualar tonos mediante mezcla aditiva. Esta variación es mayor para deuteranopes, para los que se dan diferencias importantes entre los puntos de convergencia de distintos observadores (Morland & Ruddock, 1993; Nimeroff, 1970).

Una de las líneas de confusión permite especificar estímulos pseudoacromáticos, esto es, aquellos en los que los tricrómatas comunes aprecian tonos cromáticos, pero que los

daltónicos dicrómatas ven acromáticos. Los colores pseudoacromáticos se sitúan en la línea de confusión que pasa por el punto acromático del diagrama (próximo a $u' = 0,21$; $v' = 0,47$). El punto en el que esta línea corta con el límite espectral se conoce como punto neutral o longitud de onda pseudoacromática. Los puntos medios en que se produce este corte con la parte curva del diagrama son, aproximadamente, 490 (tono verde-azulado) para protanopes y 498 nm (tono verdoso) para deuteranopes (véase Pridmore 2014 tabla 1 para un resumen de resultados obtenidos en varias investigaciones). Estas líneas también intersectan la línea de los morados. Los pseudoacromáticos de los protanopes son verdes-azulados y morados rojizos y los de los deuteranopes son verdes-azulados y morados azulados.

Los puntos correspondientes a las longitudes de onda pseudoacromáticas son valores medios calculados a partir de una muestra de dicrómatas y varían entre observadores. La magnitud de la variabilidad hace que se den solapamientos entre los valores de protanopes y deuteranopes. Por tanto, este es un parámetro poco adecuado para diagnosticar diferencialmente el tipo de dicromatismo. Este problema no se da para los puntos pseudoacromáticos situados en la línea de los morados. Por ello, las láminas de diagnóstico diferencial utilizadas en algunos test clásicos (p. ej. las últimas del test de Ishihara) suelen utilizar estímulos pseudoacromáticos cuya localización se incluye en la línea de los morados para, respectivamente, protanopes y deuteranopes.

3. Diagnóstico

Existen diferentes tipos de pruebas para detectar deficiencias en la visión del color (Birch, 2001, cap. 7; Fletcher & Voke, 1985, cap. 7; Lillo & Moreira, 2013, cap. 5). Dado que todas ellas presentan cierto margen de error, lo más adecuado es emplear varias antes de efectuar un diagnóstico. Estas herramientas pueden clasificarse en: anomaloscopios, test de láminas pseudoisocromáticas, test de ordenación y test de linterna.

A. Anomaloscopios

El Anomaloscopio de Nagel es el instrumento más preciso para diagnosticar alteraciones de la visión del color. De hecho, es la referencia que se emplea para evaluar la

eficiencia del resto de herramientas de evaluación respecto a las alteraciones relacionadas con el funcionamiento de proto y deuteranops (Birch, 2001; Lillo & Moreira, 2004). El anomaloscopio de Nagel presenta monocularmente un círculo luminoso dividido en dos mitades en el que debe realizarse lo que se conoce como “ajuste de Rayleigh” y que se describe a continuación.

Una de las dos mitades del anomaloscopio permite presentar una mezcla de dos estímulos (rojo = 670 nm; verde = 546 nm, Birch, 2001, cap. 5) en la que se varía la cantidad relativa de cada componente. En la otra se presenta una estimulación de referencia (amarillo = 589 nm, Birch, 2001, cap. 5). La tarea del evaluado es ajustar la intensidad de la mitad de referencia hasta lograr que se perciba como la mezcla presentada en la otra mitad (en los casos en los que sea posible). El diagnóstico se efectúa en función de dos criterios: (1) La amplitud del rango de mezclas donde la igualación es posible (para los dicrómatas rojo-verde cualquier mezcla de estos colores puede metamerizarse mediante una cantidad específica de luz amarilla; para los tricrómatas anómalos solo es posible metamerizar un rango limitado de mezclas). (2) La intensidad del estímulo de referencia que permite metamerizar cada mezcla (para las alteraciones protán, la intensidad es menor cuanto mayor sea la proporción de rojo en la mezcla).

El ajuste de Rayleigh permite diagnosticar las alteraciones de la percepción del color incluidas en el grupo de los daltonismos (protanopia, deuteranopia, protanomalia, deuteranomalia). Desde mediados del siglo pasado los anomaloscopios suelen incorporar la posibilidad de realizar otro tipo de ajuste, el de Moreland, útil para diagnosticar alteraciones de tipo tritán. Tal ajuste implica presentar en una de las dos mitades una estimulación de 480 nm (azul), y a la que se le añade luz de 580 nm en una cantidad fija, y en la otra una mezcla de luz azulada (436 nm) y verdosa (490 nm; Sharpe et al. 1999).

B. Test de Láminas Pseudoisocromáticas

Los test de láminas pseudoisocromáticas utilizan colores que son iguales (isocromáticos) para sujetos con alteraciones pero no para los observadores comunes. Debido

a que los colores utilizados en estas pruebas suelen ser superficies que reflejan la luz, es esencial que su aplicación se realice en condiciones de iluminación adecuadas. Estos test son los más frecuentemente utilizados para detectar la presencia de las alteraciones en la percepción del color debido a su bajo precio y fácil aplicación. Puede encontrarse una descripción detallada de estas pruebas en distintas fuentes (Birch, 2001, cap. 7; Fletcher & Voke, 1985, cap. 7). En este apartado solo mencionaremos las directamente relacionadas con nuestra investigación y/o de mayor difusión en nuestro país.

El test pseudoisocromático de uso más extendido es el de Ishihara (1982), cuya primera versión data de 1917. Su principal limitación es que no permite detectar defectos tritán (aunque sí cualquier tipo de daltonismo). La prueba utiliza láminas en las que aparecen círculos de distintos tamaños que, gracias a su parecido cromático, permiten identificar distintos tipos de formas (números, figuras geométricas o contornos). Por ejemplo, en una lámina los círculos que forman el fondo presentan, para los observadores comunes, diferentes tonalidades de verde y los círculos que forman el número presentan distintas tonalidades de naranja. Trabajar con varios verdes y varios naranjas incrementa la posibilidad de que se estos colores se confundan en observadores con deficiencias en la visión del color. La naturaleza de las confusiones permite detectar, con un cierto margen de error, la existencia de un daltonismo y su tipo (alteración protán o deután). Se trata de un test muy sensible, que detecta cualquier tipo de alteración por muy leve que sea, pero su alto grado de sensibilidad hace que no sea adecuado para diagnosticar la severidad de las alteraciones detectadas.

Otro test pseudoisocromático de uso extendido es el “*The City University Test*” (CUT, Fletcher, 1980). Las láminas de esta prueba presentan en su centro un círculo de color que actúa como estímulo de referencia. Alrededor del mismo, aparecen otros cuatro círculos con colores diferentes. El evaluado debe indicar cuál de ellos es más similar al de referencia. Esta prueba permite detectar y diferenciar no solo daltonismos, sino también alteraciones de tipo tritán. Además, es adecuada para valorar la severidad de las alteraciones. Su uso está muy extendido en el ámbito laboral.

El TIDA (Test de Identificación de Daltonismos, Lillo, 1996) se diseñó para facilitar el diagnóstico de niños pequeños (a partir de 4 años de edad). La mayor parte de sus láminas presentan un conjunto de estímulos acromáticos (figuras de monos blancos, grises o negros), siendo tarea del evaluado seleccionar de entre los miembros de otro conjunto (cromáticos, pseudogrisés) aquellos que se perciben como semejantes a los de referencia (grises). Esta prueba permite un diagnóstico similar al proporcionado por el test de Ishihara (1982): detecta daltonismos, permite diferenciar su tipo pero además proporciona una primera aproximación respecto al nivel de severidad de la alteración.

Entre las pruebas de láminas pseudoisocromáticas sensibles a las alteraciones de tipo tritán se incluye el “*Album Tritan*” (Lanthony, 1985). Esta prueba, de aplicación muy rápida, utiliza 5 láminas en las que aparece un rombo formado por círculos de tonalidad grisácea salvo en una de sus esquinas, en la que los círculos tienen una tonalidad morada. Los sujetos deben detectar cuál es la esquina del rombo que presenta una tonalidad distinta. La prueba descrita permite efectuar una primera evaluación de la severidad de las alteraciones tritán.

C. Test de Ordenación

Los observadores con alteraciones en la percepción del color diferencian menos colores que los observadores comunes. Por ello tienen menos capacidad para apreciar diferencias entre colores que los sujetos con visión normal del color. Como consecuencia, no pueden ordenar estímulos (basándose en su parecido) en forma similar a como lo hacen los observadores comunes. El test de ordenación de uso más común es el test de *Farnsworth-Munsell* (Farnsworth, 1957) y su primera edición data de 1943. En él se presenta una serie de 85 fichas que, para los observadores comunes, son idénticas en claridad y cubren toda la extensión del círculo de colores. La tarea de los evaluados es ordenar las fichas por su parecido. En función del tipo y la magnitud de las variaciones en el orden ajustado se puede efectuar un diagnóstico del tipo (protán, deután y tritán) y magnitud (anomalías o anopias) de las alteraciones en la percepción del color. Además, la prueba se puede utilizar para seleccionar, entre los observadores comunes, aquellos con mejor visión del color (algo muy

útil para ciertas profesiones). La prueba de Farnsworth-Munsell ha dado lugar a algunas versiones simplificadas de gran difusión, entre las que se incluye el D-15 (Farnsworth, 1957).

D. Test de Linterna

Los test de linterna son frecuentemente utilizados para decidir si una persona con alteraciones en la percepción del color puede desempeñar un determinado tipo de actividad profesional. Por ejemplo, para decidir si debe ser excluido de actividades relacionadas con el transporte (piloto de avión, patrón de barcos, etc.). En esencia, lo que hacen estas pruebas es presentar estimulaciones luminosas que imitan a las utilizadas en ciertas situaciones reales (p. ej. señales para barcos en la oscuridad) y pedir a los evaluados que denominen su color. El tipo y la frecuencia de los errores cometidos (denominaciones distintas a las que proporcionaría una persona con visión normal del color) sirven para diagnosticar el tipo y la severidad de la alteración y, lógicamente, los posibles problemas de los evaluados en la ejecución de ciertas tareas.

Las linternas de Holmes-Wright (1982) constituyen, probablemente, la prueba de denominación de estímulos luminosos más utilizada. En ella se utilizan dos rojos, dos verdes y un blanco cuyas coordenadas cromáticas coinciden con las recomendadas internacionalmente para este tipo de señales (código basado en el color de las luces). Puede encontrarse una descripción detallada tanto de esta prueba como de otras similares en Birch (2001).

iii. Alteraciones en la Visión del Color y Problemas Aplicados

1. Denominación del Color

Como comentamos en el capítulo anterior (véase [apartado 2.iii.1](#)), los espacios y diagramas de color son representaciones de los colores, tridimensionales y bidimensionales respectivamente, en las que las distancias representadas guardarían correspondencia, aunque no perfecta, con las diferencias experimentadas entre los colores. El lenguaje permite

segmentar tales espacios y diagramas para facilitar la comunicación entre observadores, de manera que los hablantes de una misma lengua utilicen el mismo nombre (término de color) para denominar un conjunto de estímulos (correspondientes a la misma categoría de color). La frecuencia de uso de determinados términos para denominar de manera consistente ciertas categorías (Kay, Berlin, Maffi, Merrifield, & Cook, 2009; Lillo & Moreira, 2013) define los conceptos de términos de color básicos (TCBs) y categorías de color básicas (CCBs). Cada TCB denomina una CCB y se denominan básicos/as porque son el menor conjunto de términos/categorías que permiten denominar/categorizar todos los colores en un lenguaje determinado.

Hay una gran variabilidad en el número de TCBs/CCBs dependiendo de la lengua (Kay et al., 2009), aunque también existen similitudes entre ciertas lenguas. En castellano, existen 11 CCBs que se denominan con 11 TCBS (rojo, verde, amarillo, azul, naranja, morado, rosa, marrón, blanco, negro y gris). En inglés también existen 11 CCBs, aunque los TCBs utilizados en cada idioma son diferentes: por ejemplo el TCB rojo, en castellano, denomina una CCB muy similar en términos colorimétricos a la CCB denominada por el TCB *red*, en inglés (Lillo, Moreira, Vitini, & Martín, 2007).

En relación a los observadores con alteraciones en la visión del color, es importante recordar que en el [apartado 3.ii.2](#) comentamos la existencia de estímulos metámeros: físicamente diferentes pero perceptivamente idénticos, y pseudometámeros: estímulos físicamente diferentes y diferenciables por parte de los observadores comunes, pero indistinguibles para los daltónicos dicrómatas. Combinar la existencia de los pseudometámeros con la de las CCBs, lleva a predecir que algunos de esos pseudometámeros deben pertenecer, para un observador normal, a CCBs diferentes, y al tiempo, ser indiferenciables para un dicrómata. En tal situación, ¿cómo puede esta persona utilizar nombres diferentes para algo que percibe exactamente igual? Obviamente deben producirse errores en la denominación del color, y en general, confusiones entre categorías.

Numerosas investigaciones se han ocupado de los errores de denominación del color en daltónicos dicrómatas (Boynton & Scheibner, 1967; Lillo, Moreira, et al., 2014; Montag,

1994; Moreira et al., 2014; Ramaswamy & Hovis, 2011). Algunas han demostrado la influencia de la actividad residual rojo-verde, descrita en el [apartado 3.ii.1](#), en la reducción en el número de errores en la denominación del color (Montag, 1994; Montag & Boynton, 1987; Moreira et al., 2014; Nagy & Boynton, 1979; Wachtler et al., 2004).

2. Usos del Color

Las deficiencias en la visión del color afectan a la experiencia cromática (no se ven las cosas en la forma habitual) y a cómo se interactúa con el entorno físico y social. En algunas sociedades, como la japonesa, los problemas en la visión del color no se admiten públicamente, pues se consideran un grave defecto (McIntyre, 2002).

Existen situaciones en las que los daltónicos tienen innegables dificultades para responder adecuadamente (p. ej. en respuesta a la estimulación luminosa utilizada en muchos teléfonos móviles o a la hora de utilizar ciertos mapas). Sin embargo, en algunos casos, las dificultades de los observadores con alteraciones en la percepción del color pueden superarse mediante un buen diseño de entornos y materiales (p. ej. ningún peatón o conductor daltónico tiene dificultades para entender un semáforo). Estas dificultades son cada vez mayores en un mundo donde el uso de los colores es cada vez más extendido (Cole, 2004). Antes de analizarlas, clasificaremos los usos más habituales del color siguiendo el siguiente esquema (basado en Lillo & Moreira, 2013, apartado 5.2):

- *Segregación perceptiva y facilitación de tareas de búsqueda*: el color se utiliza para diferenciar las distintas partes de algo. Por ejemplo, en los mapas geográficos, en los que cada región administrativa presenta una tonalidad diferente (Figura 8). Además los cambios en color se utilizan para facilitar la búsqueda de determinados elementos, pues éstos aparecen resaltados, “saltan a la vista”. Por ejemplo, cuando se quiere destacar una palabra en un texto, es habitual que se emplee en ella tinta de color diferente a la utilizada en el resto del texto (Figura 9).



Figura 8. Uso del color como facilitador de la segregación perceptiva.

My yellow comprehends the red, orange, yellow, and green of others; and my blue and purple coincide with theirs. That part of the image which others call red appears to me little more than a shade, or defect of light; after that the orange, yellow and green seem one colour, which descends pretty uniformly from an intense to a rare yellow, making what I should call different shades of yellow. (Dalton, 1798, p. 31).

Figura 9. Uso del color como facilitador de tareas de búsqueda.

- *Código simbólico*: el color se usa para transmitir un significado. Por ejemplo, en muchas señales y códigos el rojo se asocia a prohibiciones, el amarillo a una situación de advertencia y el verde al buen funcionamiento de un sistema (Figura 10).



Figura 10. Uso del color como código simbólico.

- *Base de material informativo:* El color se usa como fondo sobre el que pueden presentarse contornos (p. ej. letras sobre fondos cromáticos). En este tipo de situaciones no es infrecuente que una mala elección de las tonalidades del fondo y las letras hagan difícil la lectura (Figura 11). Estos problemas suelen aparecer cuando se cambia la forma de presentación de, supuestamente, una misma combinación de colores. Por ejemplo, cuando un mismo documento informático se contempla en dos monitores diferentes, o cuando éste pasa a contemplarse en su versión impresa. La causa del problema es que la misma orden informática produce colores algo diferentes en los distintos dispositivos utilizados (pantalla, impresora, etc.).

My yellow comprehends the red, orange, yellow, and green of others; and my blue and purple coincide with theirs. That part of the image which others call red appears to me little more than a shade, or defect of light; after that the orange, yellow and green seem one colour, which descends pretty uniformly from an intense to a rare yellow, making what I should call different shades of yellow. (Dalton, 1798, p. 31).

Figura 11. Uso inadecuado del color como base de material informativo.

3. Consecuencias Aplicadas de las Alteraciones en la Visión del Color

Las alteraciones de la visión del color afectan a todas aquellas actividades cotidianas relacionadas con alguno de los usos del color citados en el [apartado 3.iii.2](#). Se han realizado algunos estudios al respecto (Cole, 2002; Steward & Cole, 1989):

- *Alimentación*. Escoger fruta, verdura, carne o pescado es una tarea que puede plantear dificultades a los observadores con alteraciones en la percepción cromática, pues mucha información importante para tomar decisiones se basa en el color (p. ej. la apariencia verdosa-amarillenta de un plátano indica su nivel de madurez). Por otra parte, los cambios en el color de los alimentos son una de las claves más relevantes para determinar cuándo deben finalizar ciertos procesos culinarios (p. ej. la cocción o la fritura).
- *Interacción social*. El estado de humor o de ciertos estados de salud de los otros se refleja en el color de la piel. La dificultad para hacer inferencias relacionadas con el aspecto puede hacer que los demás juzguen a los observadores con alteraciones en la visión del color como insensibles al estado anímico de otras personas. El color de la piel puede también informar sobre posibles riesgos para nosotros mismos o para personas a nuestro cargo (p. ej. cara a evitar una quemadura solar).
- *Vestimenta*. Una parte sustancial de la información importante a la hora de comprar y combinar ropa se basa en su color. Vestirse es un comportamiento eminentemente social: nos vestimos para nosotros y para los demás. Obviamente, los observadores con alteraciones en la percepción del color, al tener experiencias de color diferentes a las comunes, pueden adquirir o vestir ropa que otras personas consideran poco adecuada.
- *Conducción*. Es una de las actividades cotidianas en las que más se emplea el color como código simbólico. Los problemas para los observadores con deficiencias en la visión del color aumentan cuando empeoran las condiciones de iluminación, por lo que tienen preferencia por conducir de día (Tagarelli et al.,

2004). En general tienen más riesgo de sufrir accidentes (Cole & Maddocks, 1997; Vingrys, 2002).

- *Ocio*. Al realizar deportes de equipo, pueden aparecer dificultades para distinguir entre nuestro conjunto y el contrario por el color de su indumentaria (Rosenthal & Phillips, 1997). También se han detectado problemas en algunos deportes acuáticos en relación a las boyas y señalizaciones, sobre todo en condiciones de iluminación deficientes (Kinney, Paulson, & Beare, 1979). Por otra parte, también aparecen dificultades en relación a la práctica de otras actividades lúdicas como la jardinería (distinguir el verde sano y el marrón enfermizo de una planta puede ser difícil) o la decoración (a ella se extienden los mismos problemas referidos en relación a la vestimenta). Por último, algunas actividades estéticas, como el disfrute de la pintura o de la fotografía, pueden verse alteradas en observadores con alteraciones cromáticas.
- *Aprendizaje*. En los sistemas educativos convencionales es habitual que los profesores utilicen códigos de colores para apoyarse en la explicación de determinados conceptos, ya sea mediante libros de texto u otro tipo de soporte visual. Si la selección de colores no es adecuada (Torrents, Bofill, & Cardona, 2011), los alumnos con deficiencias en la visión del color pueden tener dificultades. Existe controversia respecto a si el rendimiento escolar está significativamente afectado por las deficiencias en la visión del color (Melgosa, Huertas, & Hita, 2006; Montanero et al., 2003).

Ocupémonos ahora de las dificultades que pueden plantear las alteraciones de la visión del color en el desempeño de algunas profesiones. En todas las sociedades ciertas actividades están prohibidas legalmente para los observadores con alteraciones en la visión del color, debido a los riesgos derivados de los errores que pueden cometer. Steward y Cole (1989) realizaron un estudio en el que un 30% de los participantes con alteraciones en la visión del color informó de que su deficiencia les influyó a la hora de elegir profesión (rechazaron elegir ciertas profesiones debido al uso de los colores esperado en ellas). Entre aquellas cuyo desempeño se considera más afectado por las alteraciones en la visión del color destacan las siguientes:

- *Transporte.* Independientemente de que sea aéreo (Birch, 1999), marítimo (Kinney et al., 1979) o terrestre (Cole & Maddocks, 1997; Tagarelli et al., 2004; Vingrys, 2002), las dificultades de los observadores con alteraciones en la visión del color pueden dar lugar a accidentes. Reaccionar tarde o de manera incorrecta a las señales o a los displays de los vehículos, puede comprometer la seguridad (Cole & Macdonald, 1988). Las dificultades de los observadores con deficiencias en la visión del color podrían incrementarse si usan gafas de sol al conducir (Dain, Wood, & Atchison, 2009).
- *Profesiones clínico-sanitarias.* Debido a la importancia de lograr un desempeño óptimo en ciertas tareas clínicas, se han realizado numerosos estudios (Spalding, 1997) sobre este sector profesional, identificándose diversas dificultades relacionadas con: (1) la detección de signos y síntomas en el color de la piel (Campbell, Spalding, & Mir, 2004), (2) la identificación-categorización de resultados de análisis clínicos (Campbell, Spalding, Mir, & Birch, 2000), (3) la observación por microscopio o (4) los exámenes retinianos. Estas dificultades dan lugar a una menor probabilidad de realizar diagnósticos adecuados. Para terminar, aunque como hemos visto disponer de una visión cromática normal es importante para desempeñar adecuadamente muchas actividades relacionadas con el sector clínico, la evaluación de la visión del color no es una práctica habitual entre los profesionales sanitarios. Para paliar parcialmente esta situación recientemente se ha desarrollado una página web que pretende servir de ayuda a los trabajadores del sector sanitario (Spalding, Cole, & Mir, 2010): <http://www.colourmed.com/>.
- *Cuerpos de seguridad.* Los miembros del ejército, la policía o los bomberos, realizan actividades peligrosas que implican el uso de colores. Por eso suele ser preceptiva la evaluación de la capacidad cromática entre los candidatos a pertenecer a las mencionadas instituciones, obviamente para determinar quiénes no pueden ingresar en ellas y/o realizar ciertas actividades. Sin embargo, frecuentemente tal evaluación se efectúa de manera inadecuada (p. ej. solo con la mera aplicación de un test de Ishihara) y produce los dos siguientes tipos de recomendaciones inadecuadas: (1) rechazo de observadores sin problemas para realizar ciertas tareas, (2) prohibición de actividades a observadores que las

pueden realizar. El origen de estos errores radica en que frecuentemente se consideran las alteraciones en la percepción del color como un problema “todonada”, y por tanto se asume erróneamente que todas las alteraciones producen limitaciones conductuales semejantes. Como hemos indicado en el [apartado 3.i](#), existe una gran variedad de alteraciones con efectos diferentes. Por tanto, no es adecuado concluir que, por ejemplo, las limitaciones que afectan a un protanope deban suponer también problemas para quien solo sufre una deuteranomalía leve.

Es habitual que para profesiones cuyo desempeño se considera más afectado por las alteraciones de la visión del color, diversas instituciones propongan estándares que deben cumplir los candidatos para poder acceder a ellas. A modo de ejemplo expondremos los propuestos por la CIE para el transporte (CIE, 1999) que podrían extenderse a otros sectores profesionales (adaptado de Birch 2001, p. 137):

- *Estándar 1: visión del color normal.* Se requiere este tipo de visión en actividades de alto riesgo en las que el reconocimiento de señales luminosas u otros códigos en la distancia es crítico para la seguridad. Se recomienda emplear el test de Ishihara (1982).
- *Estándar 2: visión del color con deficiencia ligera.* Se admite este tipo de visión en actividades de bajo riesgo en las que se requiere el reconocimiento de luces a distancias medias. Los observadores con alteraciones de tipo deután superan este estándar. Las pruebas recomendadas son el test de Ishihara (1982), un test de linterna validado y un anomaloscopio, para excluir los observadores con alteraciones de tipo protán. Los test de linterna validados por la CIE son las linternas de Holmes-Wright (1982), la linterna de Farnsworth y la linterna de Beyne.
- *Estándar 3: visión del color con deficiencia moderada.* Se admite este tipo de visión en actividades de bajo riesgo en la que se requiere reconocer colores de superficie. La prueba recomendada es el *Farnsworth-Munsell D15* (Farnsworth, 1957).

Capítulo 4. Herramientas de Simulación del Color

i. ¿Cuál es la Experiencia Perceptiva de un Dicrómata?

Una de las grandes preguntas de la ciencia del color ha sido: ¿qué ve un dicrómata? (Boynton, 1979; Broackes, 2010b; Viénot, Brettel, Ott, Ben M'Barek, & Mollon, 1995). A pesar de las numerosas investigaciones que se han ocupado de esta cuestión, seguimos sin obtener una respuesta definitiva, y algunos de los autores apuntan que “*la cuestión de qué ven ‘realmente’ los dicrómatas probablemente nunca podrá resolverse*” (Boynton, 1979, p. 382) pues “*la cualidad de las sensaciones de otra persona nunca puede conocerse plenamente*” (Viénot et al., 1995, p. 128). Existen dos teorías que intentan aproximarse a la respuesta (Byrne & Hilbert, 2010). La primera de ellas, conocida como hipótesis de *Köning*, propone que la experiencia visual de los dicrómatas es una versión reducida (*reduction view*, en inglés) de lo experimentado por los observadores comunes. La segunda, propone que la experiencia cromática de un dicrómata podría ser cualitativamente diferente a la de un observador común, pudiendo percibir lo que se conoce como tonalidades exóticas (*alien hues*, en inglés), incomparables e inclasificables desde la percepción de un observador común.

ii. Evidencia Procedente de Dicrómatas Unilaterales y Dicrómatas Adquiridos

Existen dos tipos de datos clásicos que podrían decantar la balanza por una de estas dos teorías (Hardin, 1993). Por un lado, los estudios con dicrómatas unilaterales. Estos individuos tienen una visión del color relativamente normal en un ojo y una visión dicrómata en el otro. Los estudios con dicrómatas unilaterales han utilizado principalmente dos tareas: descripción de los estímulos presentados en el ojo dicrómata o igualación entre lo percibido con el ojo dicrómata y con el ojo con visión normal del color. Como bien muestra la revisión de este tipo de estudios realizada recientemente por (Broackes, 2010a), la experiencia dicrómata es una reducción de la experiencia común, en el sentido de que las sensaciones cromáticas más fuertes se dan en el eje amarillo-azul, pero también aparece cierta

discriminación residual en el eje rojo-verde con tamaños estímulares mayores (por encima de 3°, véase [apartado 3.ii.1](#)).

Por otra parte, son relevantes las experiencias de individuos con dicromatismos adquiridos, pues cuentan con la experiencia previa a la alteración (visión común del color) y posterior a la misma (visión defectiva del color). Sin embargo, lo más común en estos casos es que el fotopigmento afectado sea el del cono S (Sperling, 1991), en lugar de los conos M o L, como sucede en los dicromatismos más comunes (véase [apartado 3.ii.1](#)). Esto, unido al hecho de que este tipo de condiciones conllevan otro tipo de peculiaridades que finalizan en ceguera en lugar de dicromatismo, impide que los datos de dicromatismos adquiridos sean de utilidad para el debate (Byrne & Hilbert, 2010).

La ausencia de datos que apoye la teoría de las tonalidades exóticas ha hecho que la versión reducida sea tomada como la teoría ortodoxa o estándar dentro de la ciencia del color.

iii. Teoría de la Versión Reducida: Modelo de Brettel et al. (1997)

Partiendo del supuesto de que la visión de los observadores dicrómatas es una *versión reducida* de la de los tricrómatas normales, Brettel, Viénot y Mollon (1997) propusieron un modelo para simular la visión dicrómata y así posibilitar que los tricrómatas normales puedan experimentar la reducción en la gama de colores que experimenta un dicrómata (Figura 12). Se trata de una transformación colorimétrica pero que también hace asunciones acerca de las experiencias perceptivas en dicrómatas, permitiendo simular la apariencia de cualquier escena, independientemente de su complejidad, para cualquier tipo de dicrómata dado.

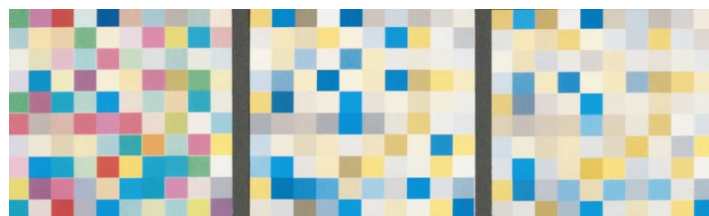


Figura 12. Simulación de la apariencia del color en daltónicos dicrómatas. Esta figura, adaptada de Brettel et al. (1997, Fig. 3) ilustra la reducción de la gama cromática respecto a un observador común (izquierda) para protanopes (centro) y deuteranopes (derecha). Los colores de la figura son solo una aproximación de los colores transformados mediante el algoritmo debido a imprecisiones de reproducción.

El algoritmo propuesto por Brettel et al. (1997) establece, para un estímulo \mathbf{Q} (estímulo original) y un tipo de dicrómata dado, la existencia de un estímulo \mathbf{Q}' (estímulo transformado), que sería indistinguible de \mathbf{Q} para ese tipo de dicrómata y que produciría la misma experiencia cromática tanto en tricrómatas normales como en dicrómatas del tipo considerado. Para realizar la transformación de \mathbf{Q} en \mathbf{Q}' , Brettel et al. (1997) utilizan colorimetría LMS, basada en las respuestas de los conos L, M y S. Para calcular las respuestas de los tres tipos de conos se sirven de los fundamentales de Stockman, MacLeod y Johnson (1993). El punto de partida del procedimiento son los valores de activación de los tres tipos de conos para el estímulo original (L_Q , M_Q , S_Q) y el objetivo es obtener los valores equivalentes para el estímulo transformado ($L_{Q'}$, $M_{Q'}$, $S_{Q'}$).

Aplicando la lógica de las líneas de confusión (véase [apartado 3.ii.2](#)), en el espacio tridimensional en el que se representarían las respuestas de los tres tipos de conos, tales líneas incluirían los estímulos que solo varían en la activación del cono ausente (L en protanopes, M en deuteranopes), mientras la excitación de los dos conos restantes no varía. Las líneas de confusión serían paralelas al eje L ($M_{Q'} = M_Q$ y $S_{Q'} = S_Q$) en el caso de los protanopes y al eje M ($L_{Q'} = L_Q$ y $S_{Q'} = S_Q$) en el caso de los deuteranopes. Para determinar qué experiencia concreta producen los estímulos situados en dicha recta, toman como referencia los estudios de dicrómatas unilaterales (Broackes, 2010a) y formulan los siguientes supuestos:

1. Los observadores comunes y los dicrómatas comparten la misma percepción ante un estímulo equi-energético, \mathbf{aE} , con independencia de su intensidad. Las coordenadas de \mathbf{E} se definen como las del metámero más luminoso posible de un estímulo equi-energético en el monitor considerado. A partir del punto de origen \mathbf{O} , en el que la activación de los tres tipos de conos es neutra ($L_O = M_O = S_O = 0$), y del estímulo \mathbf{E} , se define el eje neutral OE que representa los estímulos neutrales para dicrómatas y tricrómatas normales.
2. A partir de los datos de dicrómatas unilaterales se conoce que la percepción de los estímulos espectrales de 575 nm y 475 nm (amarillo y azul, respectivamente) coincide para protanopes y deuteranopes (los dicrómatas estudiados en la presente tesis) con la de los observadores comunes. El eje neutral OE , junto con las coordenadas de estos dos estímulos, permite reducir el espacio tridimensional LMS a los dos semiplanos que constituyen el conjunto de experiencias cromáticas comunes para daltónicos dicrómatas y tricrómatas normales.

Las coordenadas del color $\mathbf{Q'}$ se determinan por la intersección de la línea de confusión correspondiente y el semiplano definido por el origen \mathbf{O} , el estímulo equi-energético \mathbf{E} , y el estímulo espectral correspondiente a 575 nm o 475 nm.

Siguiendo este procedimiento, se pueden computar los valores correspondientes a la gama de colores supuestamente experimentada por un tipo de dicrómata (aquí nos hemos centrado en protanopes y deuteranopes), para cualquier imagen, realizando el procedimiento tantas veces como $i \times j$ elementos compongan la imagen. Aunque los propios autores reconocen que “*la cualidad de la sensación de otro nunca puede ser completamente conocida, la simulación ilustra, para observadores comunes, el rango experimentado por los observadores daltónicos*” (Viénot et al., 1995, p. 128).

iv. Herramientas de Simulación

Las herramientas de simulación del color transforman los estímulos visibles para, supuestamente, conseguir que las personas comunes vean los mismos colores que las

personas con una alteración concreta en la visión del color. Disponer de buenas herramientas para simular la visión dicrómata, (Viénot et al., 1995), permite seleccionar colores adecuados tanto para dicrómatas como para observadores comunes. Partiendo de la definición clásica de simulación de Shannon y Johannes (1976), las herramientas de simulación del color se basarían en un modelo de visión dicrómata con el que se podría experimentar para: (1) comprender el comportamiento de los dicrómatas y (2) detectar problemas de desempeño (p. ej. derivados de la presencia de estímulos pseudoisocromáticos), y si es posible, resolverlos mediante estrategias relacionadas con el enfoque del diseño universal.

El enfoque del diseño universal pretende crear objetos y entornos adecuados al mayor número posible de usuarios (Vanderheiden & Jordan, 2012). En lo que tiene que ver con la utilización de colores, lograr este objetivo implica realizar diseños considerando no solo a los usuarios comunes (tricrómatas normales), sino también a los que tienen alguna deficiencia en la percepción del color. Esto es, se pretende que el uso de los colores (véase [apartado 3.iii.2](#)) no genere problemas ni para los daltónicos ni, por supuesto, para los observadores comunes. Tales problemas se darían si, por ejemplo, un diseño incorporase pares de estímulos pseudoisocromáticos con significados diferentes.

A partir de lo anterior, puede considerarse que la secuencia de uso habitual de los instrumentos de simulación de los colores es la siguiente:

1. La herramienta modifica los colores de la escena original para hacerlos similares a los vistos por un tipo específico de dicrómata.
2. Los colores modificados permiten detectar pares de colores pseudoisocromáticos.
3. A veces, la herramienta propone un cambio de color para convertir los pares pseudoisocromáticos en estímulos diferenciables (Nakauchi & Onouchi, 2008).

El tipo de modificación que se realice en la primera etapa define el tipo de simulación realizado:

- Simulación óptica: Se altera la imagen que llega a la retina mediante el uso de un sistema de filtros (por ejemplo “Variantor”, <http://www.variantor.com/en/>). Su gran ventaja es que la transformación funciona en tiempo real. Este tipo de herramienta permite realizar las dos primeras fases de la secuencia de uso: modificación de la escena original y detección de pares pseudoisocromáticos.
- Simulación informática: parte de imágenes digitalizadas sobre las que actúan los algoritmos de transformación (Brettel et al., 1997; Capilla, Díez-Ajenjo, Luque, & Malo, 2004). Lo habitual es que estas herramientas solo implementen las dos primeras fases de la secuencia de uso, (modificación de la escena original y detección de pares pseudoisocromáticos, por ejemplo “Vischeck”, <http://www.vischeck.com/>), aunque algunas incorporan programas de sustitución (Nakauchi & Onouchi, 2008), que realizan la tercera fase de la secuencia de uso. La herramienta “Daltonize” (<http://www.vischeck.com/daltonize/>) complementaria de “Vischeck” es un buen ejemplo de lo que se acaba de decir. En esencia, lo que hacen estas herramientas es cambiar un miembro de un par pseudoisocromático creado al simular la visión dicrómata para que los daltónicos no lo confundan con el otro miembro del par.

Si la primera etapa, aquella en la que se modifican los colores de la escena original, se realiza inadecuadamente, las demás carecen de utilidad. Por ello es importante poder comprobar que la simulación de los colores se realiza adecuadamente. Este es el aspecto en el que se centra la primera de las investigaciones que componen esta tesis doctoral (Lillo, Álvaro, & Moreira, 2014). En ella se describe un nuevo método para evaluar herramientas de simulación del color al que se denomina “Simulcheck”. Tal método se aplica a tres herramientas de simulación ya existentes. Una óptica, las gafas “Variantor”, distribuida por *Cambridge Research Systems* (<http://www.variantor.com/en/>). Dos informáticas de libre acceso denominadas, respectivamente, “Coblis” (<http://www.color-blindness.com/coblis-color-blindness-simulator/>) y “Vischeck” (<http://www.vischeck.com/>).

Capítulo 5. Preferencias del Color

i. Revisión Histórica de los Estudios de Preferencias del Color

Los estudios sobre preferencias del color evalúan, de alguna manera, el grado de agrado-desagrado experimentado por alguien al contemplar un determinado color. El primer estudio del que se tiene constancia en este ámbito fue realizado en el laboratorio de Wundt en Leipzig (Cohn, 1894, citado por Ball, 1965). En esta investigación se utilizó un número reducido de estímulos de superficie de unas pocas pulgadas, concluyendo que las diferencias individuales en las preferencias del color se daban sobre todo con los cambios en la tonalidad y que se preferían los pares con alto contraste. A partir de este momento se realizaron numerosas investigaciones relacionadas con las preferencias del color, pero las conclusiones de dichos estudios fueron frecuentemente confusas y contradictorias (Granger, 1952). Sin duda, la forma en cómo se seleccionaron los estímulos (muy frecuentemente de manera intuitiva) y el escaso control en la presentación estimular tuvieron mucho que ver con la inconsistencia entre los resultados obtenidos (Ball, 1965).

Dos son las principales finalidades, descriptiva o explicativa, por las que puede realizarse un estudio sobre preferencias del color metodológicamente riguroso. En primer lugar, a nivel descriptivo, el objetivo es conocer qué variables se asocian a las preferencias. Por ejemplo, puede quererse conocer si la tonalidad (p. ej. ¿azul o rojo?), el sexo (¿varón o mujer?), o la cultura (¿occidental u oriental?) se relacionan con las preferencias. En segundo lugar, a nivel explicativo, puede querer conocerse el origen de las diferencias. Por ejemplo, saber si se deben al funcionamiento de mecanismos perceptivos similares en todos los humanos (p. ej. los que tienen que ver con el contraste cromático) o si, por el contrario, dependen de asociaciones creadas en una persona o grupo de personas entre ciertos colores y ciertas experiencias emocionales (p. ej. se preferirían los colores asociados a experiencias positivas). Las dos finalidades mencionadas no son mutuamente excluyentes, aunque, por otra parte, es lógico que la finalidad descriptiva anteceda temporalmente a la explicativa. En cuanto a los estudios descriptivos, algunos estudios transculturales apuntaban a diferencias entre distintas culturas o sexos (Choungourian, 1968, 1969) pero también hacia diferencias

entre distintas edades (Choungourian, 1969). Por otro lado, Eysenck (1941) halló escasas diferencias entre sexos (correlaciones de 0,95 entre los órdenes medios de preferencias de varones y mujeres) y propuso un patrón sistemático y universal de preferencias del color: azul, rojo, verde, morado, naranja y amarillo. Estos resultados fueron parcialmente replicados por Guilford y Smith (1959), que continuaron la tradición de Granger (1952) usando colores Munsell en los estudios de preferencia. Los estudios de la última década (Hurlbert & Ling, 2007; Palmer & Schloss, 2010; Taylor, Clifford, & Franklin, 2013; Taylor & Franklin, 2012) han proporcionado soporte a la idea de que ciertos colores son sistemáticamente más preferidos que otros: por ejemplo el azul tiende a ser más preferido que el amarillo. Otros estudios también han mostrado algunas variaciones culturales (Hurlbert & Ling, 2007; Ou et al., 2012; Ou, Luo, Woodcock, & Wright, 2004a, 2004b; Saito, 1994, 1996), como por ejemplo Taylor et al. (2013), cuyos resultados apuntan a que el grado de sofisticación tecnológica de una sociedad puede jugar un papel relevante en las preferencias del color.

Las investigaciones más recientes tienen un foco explicativo, centrándose en la búsqueda de los mecanismos psicofísicos (Hurlbert & Ling, 2007), emociones (Ou et al., 2004a, 2004b) o asociaciones (Palmer & Schloss, 2010) que permitan explicar y predecir las preferencias del color. Cabe destacar que los distintos modelos explicativos no son excluyentes entre sí. A continuación se describen brevemente las teorías más relevantes propuestas para explicar los resultados encontrados en el ámbito de las preferencias del color.

ii. Teoría del Contraste de Conos

Una de las conclusiones más extendidas de los estudios de preferencia tanto del pasado siglo (Eysenck, 1941; Guilford & Smith, 1959; McManus, Jones, & Cottrell, 1981) como de los últimos años (Hurlbert & Ling, 2007; Palmer & Schloss, 2010; Taylor et al., 2013; Taylor & Franklin, 2012) es que existe una tendencia hacia una preferencia máxima para azul en contraste con una preferencia menor para amarillo. A partir de estos datos, Hurlbert y Ling (2007) aplicaron el modelo de contraste de conos (Eskew, McLellan, & Giulianini, 1999) para predecir las preferencias del color.

El modelo de contraste de conos (Eskew et al., 1999) calcula la excitación relativa de cada uno de los conos retinianos para el estímulo observado en relación con el fondo sobre el que tal estímulo se presenta. A continuación las señales de los tres tipos de conos se combinan en tres subsistemas que subyacen a la visión del color (rojo-verde, amarillo-azul y luminancia). Por tanto, este modelo mide la excitación del sistema visual (respuesta ante el estímulo) teniendo en cuenta su estado de adaptación (respuesta ante el fondo).

La mayoría de los trabajos que han aplicado este modelo para explicar las preferencias del color (p. ej. Hurlbert & Ling, 2007; Taylor et al., 2013) se han centrado en los dos mecanismos cromáticos (rojo-verde y amarillo-azul), dejando de lado el acromático (o luminancia). Según el modelo aplicado por Hurlbert y Ling (2007), las respuestas de los mecanismos rojo-verde (L-M) y amarillo-azul [S-(L+M)] se calculan siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Se utilizan las coordenadas cromáticas (x e y , CIE 1931) y la luminancia (Y) junto con los fundamentales de los conos de V. C. Smith y Pokorny (1975) para calcular las respuestas de los tres tipos de conos (L, M, y S).
2. Se calculan los valores de excitación relativa de los tres tipos de conos (ΔL , ΔM , y ΔS) como sigue:

$$\Delta L = \frac{L_s - L_b}{L_b} \quad (26)$$

$$\Delta M = \frac{M_s - M_b}{M_b} \quad (27)$$

$$\Delta S = \frac{S_s - S_b}{S_b} \quad (28)$$

donde el subíndice “s” (de *stimulus*, en inglés) representa el estímulo y el subíndice “b” (de *background*, en inglés) representa el color de fondo.

3. Se calculan los valores de contraste de conos del sistema rojo-verde (L-M) y el amarillo-azul [S-(L+M)], denominados respectivamente RG y YB en el modelo original (Eskew et al., 1999), pero que para evitar confusiones con otros modelos (De Valois & De Valois, 1993), denominaremos $(L - M)_c$ y $[S - (L + M)]_c$. Aunque en la literatura previa (Hurlbert & Ling, 2007; Palmer & Schloss, 2010) se denominaban simplemente LM_c y S_c :

$$(L - M)_c = 0.7\Delta L - 0.72\Delta M + 0.02\Delta S \quad (29)$$

$$[S - (L + M)]_c = 0.8\Delta S - 0.55\Delta L - 0.25\Delta M \quad (30)$$

El primer estudio que aplicó este modelo psicofísico a las preferencias del color fue realizado por Hurlbert y Ling (2007). El experimento principal de esta investigación evaluó las preferencias del color en un grupo de 208 individuos chinos y británicos, que incluyó tanto varones como mujeres, utilizando un conjunto de 8 estímulos que variaban en tono. La tarea de los participantes consistía en escoger el estímulo preferido en una tarea de elección forzada de dos alternativas. Tras aplicar un análisis de componentes principales que mostraba que el 79% de la varianza podía explicarse sobre la base de 3 componentes, detectaron que dos de estos tres componentes coincidían con los dos mecanismos cromáticos (rojo-verde y amarillo-azul). La aplicación del modelo de contraste de conos (Eskew et al., 1999) permitió explicar un 70% de la varianza de la población total, y entre un 64% (mujeres chinas) y un 72% (mujeres británicas) dependiendo de la subpoblación considerada. En cuanto a las diferencias entre los dos mecanismos, S-(L+M) fue el mecanismo principal (el que mayor varianza explicaba) para la población general, mientras que los análisis separados por sexos mostraron que L-M solo tenía un papel relevante para explicar las preferencias en los varones.

El estudio realizado por Palmer y Schloss (2010) también evaluó la adecuación del modelo de contraste de conos para explicar las preferencias del color. La investigación evaluó las preferencias de 48 participantes americanos utilizando un conjunto de 32 estímulos, divididos en 4 subconjuntos (saturado, claro, oscuro y cálido) de 8 estímulos que variaban en tono. Los participantes debían evaluar su preferencia por cada color presentado

individualmente utilizando una escala de 0 a 10. Palmer y Schloss aplicaron un modelo más complejo, pues además de los mecanismos cromáticos (rojo-verde y amarillo-azul), añadieron el contraste acromático y la saturación como predictores, pero solo pudieron explicar el 37% de la varianza de su conjunto de 32 estímulos. Taylor et al. (2013) evaluaron el modelo de Hurlbert y Ling (2007) utilizando la misma tarea de preferencias del color y los mismos estímulos que Palmer y Schloss (2010), en participantes británicos y de una sociedad no industrializada: la tribu Himba de Namibia. La varianza explicada en la muestra británica fue algo menos de un 25%, siendo L–M el predictor más importante para varones y S–(L+M) para mujeres. En cuanto a los Himba, los varones mostraron una varianza explicada similar, pero para las mujeres no hubo ningún predictor significativo.

iii. Teoría de las Emociones de las Preferencias del Color

Ou et al. (2004b) propusieron un modelo para explicar las preferencias del color basado en las emociones, definidas como “sentimientos evocados por colores o combinaciones de colores”. Esta teoría propone que los colores se prefieren en la medida en que están asociados a emociones positivas en el observador. Se requirió a los participantes describir la emoción asociada a cada estímulo individual, en 10 ejes: cálido/frío (*warm/cool*, en inglés), pesado/ligero (*heavy/light*), moderno/clásico (*modern/classical*), limpio/sucio (*clean/dirty*), activo/pasivo (*active/passive*), duro/suave (*hard/soft*), tenso/relajado (*tense/relaxed*), fresco/rancio (*fresh/stale*), masculino/femenino (*masculine/feminine*), gustar/disgustar (*like/dislike*). Hallaron que tres de las dimensiones explicaban el 67% de la varianza de la dimensión de preferencias del color (*like/dislike*): activo/pasivo (*active/passive*, en inglés), pesado/ligero (*heavy/light*, en inglés), y cálido/frío (*warm/cool*, en inglés).

iv. Teoría de la Valencia Ecológica de las Preferencias del Color

Palmer y Schloss (2010) formularon y evaluaron una nueva teoría para explicar las preferencias del color: la teoría de la valencia ecológica (*ecological valence theory* en inglés, EVT). La EVT propone que a los individuos les gustan/disgustan determinados colores en la

medida en que les gustan/disgustan los objetos del medio ambiente que están asociados con dicho color. El razonamiento ecológico que subyace a la teoría se plantea en términos de adaptación: sería adaptativo aproximarse a objetos que gustan y evitar los que disgustan, en la medida en que tales objetos sean beneficiosos o dañinos respectivamente (Humphrey, 1976). Por ejemplo, los tonos azulados gustarían porque están asociados con el cielo despejado y el agua limpia; los tonos amarillos-verdosos no gustarían al estar asociados con secreciones gástricas o nasales.

Para evaluar la EVT realizaron un estudio compuesto por 6 tareas. La primera de ellas es la tarea de preferencias del color utilizada por Palmer y Schloss (2010), descrita en el apartado anterior (véase [apartado 5.ii](#)). La segunda tarea requirió a los mismos participantes describir la emoción asociada a cada estímulo individual, en las tres dimensiones que resultaron más predictivas en el estudio de Ou et al. (2004a): activo/pasivo (*active/passive*, en inglés), pesado/ligero (*heavy/light*, en inglés), y cálido/frío (*warm/cool*, en inglés). En la tercera tarea, los mismos 48 participantes evaluaron la apariencia de color en 4 ejes: rojo/verde, amarillo/azul, claro/oscuro y saturación. En la cuarta tarea, 74 nuevos participantes (varones y mujeres) participaron en una tarea de descripción de objetos, en la que escribieron una lista y una breve descripción de objetos asociados con el color de cada uno de los 32 estímulos del experimento. En la quinta tarea, otros 98 nuevos participantes (varones y mujeres) realizaron la tarea de evaluación de valencia (*valence-rating task*, en inglés), en la que los participantes evaluaron su respuesta emocional ante los objetos obtenidos en la tarea anterior utilizando una escala de negativo/positivo. Por último, en la sexta tarea, 31 nuevos participantes (varones y mujeres) evaluaron la correspondencia entre los 32 colores y los objetos descritos en la cuarta tarea (*color-object matching task*, en inglés).

A partir de los datos obtenidos en las 6 tareas se computaron las estimaciones ponderadas de valencia afectiva (*weighted affective valence estimates* en inglés, WAVEs) para cada uno de los 32 estímulos. La WAVE de cada estímulo es una estimación de cuánto gustan los objetos asociados con el color del estímulo. Palmer y Schloss (2010) hallaron fuertes correlaciones entre las WAVEs y las preferencias de cada uno de los estímulos, explicando las WAVEs un 80% de la varianza de las preferencias del color. Taylor y Franklin

(2012) evaluaron la EVT con participantes británicos, hallando un valor de varianza explicada similar en varones (74%) pero sensiblemente menor en mujeres (45%). Taylor et al. (2013) pusieron a prueba la EVT en la población Himba hallando un 23% de varianza explicada para todo el grupo, pero siendo la correlación entre preferencias y WAVES negativa en lugar de positiva, como sucede con las demás poblaciones. En cuanto a la diferencia entre sexos, al igual que con la muestra británica, la cantidad de varianza explicada es mayor en varones (24%) mientras que para mujeres no se halló que las WAVES fueran un predictor significativo.

v. Beneficios de un Estudio de Preferencias del Color en Dicrómatas R-V

Hasta la fecha no existía ningún estudio de preferencias del color en daltónicos dicrómatas. Disponer de este tipo de estudio permitiría avanzar en el conocimiento de cómo los dicrómatas rojo-verde perciben el color (p. ej. ¿influye la discriminación residual rojo-verde en las preferencias del color?), además de permitir evaluar teorías explicativas de las preferencias del color. En esto se centra la segunda de las investigaciones que componen esta tesis doctoral (Álvaro, Moreira, Lillo, & Franklin, 2015), que consiste en un estudio pionero tanto a nivel descriptivo como explicativo sobre las preferencias del color en daltónicos dicrómatas. Se evalúa el poder explicativo de diferentes variables en las preferencias del color, como por ejemplo las contempladas en la teoría de contraste de conos descrita en el [apartado 5.ii](#). Aunque cabe recordar, como decíamos previamente (véase [apartado 5.i](#)), que los distintos modelos explicativos no son excluyentes entre sí, la posibilidad de evaluar el modelo de contraste de conos con individuos que presentan únicamente dos tipos de conos en su retina (lo que necesariamente conlleva un procesamiento muy diferente en términos de contraste de conos, véase [apartado 3.ii](#)) sí permite valorar la capacidad predictiva de esta teoría, aunque por supuesto sin negar la posible relevancia de otras.

Capítulo 6. Objetivos e Hipótesis - Goals and Hypotheses

i. Un Método Experimental (Simulcheck) para la Evaluación de las Herramientas de Simulación del Color

1. Objetivos

- Diseñar un método que incorpore variables relevantes para evaluar herramientas de simulación del color. Tales variables se basarán en dos aspectos en los que la visión dicrómata se diferencia de la común: (1) la existencia de estímulos pseudoacromáticos. (2) Las alteraciones en la magnitud de la respuesta del mecanismo acromático.
- Evaluar la adecuación del método sobre la base de los resultados producidos por dicrómatas reales al responder a dos tipos de conjuntos estímulares. Comparar los resultados obtenidos con los predichos aplicando el algoritmo de Brettel et al. (1997).
- Evaluar herramientas de transformación mediante la aplicación del método Simulcheck a dicrómatas simulados, comparando los resultados obtenidos con: (1) la transformación producida al aplicar el algoritmo de Brettel et al. (1997); (2) el comportamiento de dicrómatas reales. Complementar la evaluación analizando la transformación colorimétrica producida por las herramientas.

2. Hipótesis

El método diseñado, Simulcheck, incorpora dos variables dependientes: h_{uv} y L_R . La primera, h_{uv} , es el ángulo cromático en el diagrama CIE $u'v'$ y se especifica para los dos tipos de estímulos pseudoacromáticos (verdes y rojos). La segunda, L_R , es la luminancia relativa de estos mismos estímulos. Las hipótesis relacionadas con estas variables son similares para los dos conjuntos estímulares utilizados (croma máximo y croma constante). Las hipótesis concretas para los dicrómatas reales y para la evaluación de herramientas de simulación fueron:

- Hipótesis 1. Protanopes y deuteranopes reales diferirán en los valores h_{uv} y L_R ajustados.
- Hipótesis 2. Para pseudoacromáticos-verdes y pseudoacromáticos-rojos los valores de h_{uv} en protanopes reales corresponderán a una variación contraria al sentido de las agujas del reloj (valores más altos en h_{uv}) respecto a los valores de los deuteranopes reales.
- Hipótesis 3. Para estímulos pseudoacromáticos-verdes los valores de L_R serán mayores que 1 para protanopes reales (claridades ajustadas mayores, $> L^*$, respecto a observadores comunes) y menores que 1 para deuteranopes reales. Sucederá lo contrario para los estímulos pseudoacromáticos-rojos.
- Hipótesis 4. Los valores h_{uv} y L_R correspondientes a los dicrómatas reales serán semejantes a los predichos mediante la aplicación del algoritmo de Brettel et al. (1997).
- Hipótesis 5. Herramientas de simulación distintas (Variantor, Vischeck y Coblis) producirán diferentes valores de h_{uv} y L_R en los dicrómatas simulados.
- Hipótesis 6. Existirá una relación entre la transformación colorimétrica producida por una herramienta de simulación y los valores h_{uv} resultantes de aplicar Simulcheck en los dicrómatas simulados. Más específicamente, los valores h_{uv} producidos por Simulcheck corresponderán a estímulos transformados bajos en saturación.
- Hipótesis 7. La evaluación de la adecuación de una simulación producirá resultados similares utilizando la diferencia en h_{uv} y L_R obtenidos en los dicrómatas simulados respecto a, alternativamente, los valores producidos por dicrómatas reales o los predichos por la aplicación del algoritmo de Brettel et al. (1997).

ii. Preferencias del Color en Dicrómatas Rojo-Verde

1. Objetivos

- Describir las preferencias del color en daltónicos dicrómatas.

- Comparar las preferencias del color de los dos tipos de daltónicos dicrómatas (protanopes y deuteranopes) con las de los observadores con visión normal, (varones y mujeres).
- Comparar entre sí las preferencias del color de los dos tipos de daltónicos dicrómatas: protanopes y deuteranopes.
- Evaluar las preferencias del color respecto a los mejores ejemplares de las categorías básicas del color (Lillo, Moreira, et al., 2014), tanto en observadores comunes (varones y mujeres) como en daltónicos dicrómatas (protanopes y deuteranopes).
- Evaluar la capacidad de la teoría clásica del contraste de conos (Eskew et al., 1999) para explicar las preferencias del color, tanto en observadores comunes como en daltónicos dicrómatas.
- Evaluar la capacidad de algunas variaciones de la teoría clásica del contraste de conos (que incorporen las peculiaridades de los daltónicos dicrómatas) para explicar las preferencias del color de estos observadores dicrómatas.
- Evaluar la capacidad de variables derivadas de los resultados obtenidos en la tarea de denominación del color para explicar las preferencias del color, tanto en observadores comunes como en daltónicos dicrómatas.
- Evaluar si la actividad residual del mecanismo rojo-verde (Moreira et al., 2014) juega un papel significativo en las preferencias del color de los daltónicos dicrómatas.

2. Hipótesis

- Hipótesis 1. Los daltónicos dicrómatas presentarán patrones de preferencias del color diferentes a los de los observadores comunes.
- Hipótesis 2. Debido a la reducida funcionalidad del mecanismo rojo-verde en los daltónicos dicrómatas (Birch, 2001), se espera que las diferencias en las preferencias de dicrómatas y tricrómatas comunes se den especialmente en relación con el eje estimular rojo-verde (y menos para el amarillo-azul).
- Hipótesis 3. Debido a lo encontrado en otros trabajos respecto a los efectos de las peculiaridades perceptivas de los daltónicos dicrómatas (Lillo, Moreira, et al., 2014;

Pridmore, 2014), se esperan mayores diferencias respecto a los observadores comunes para los protanopes que para los deuteranopes.

- Hipótesis 4. Existirá una mayor preferencia por los mejores ejemplares de las categorías básicas que para los que no lo son.
- Hipótesis 5. La teoría clásica del contraste de conos (Eskew et al., 1999) permitirá explicar parcialmente las preferencias del color de los observadores comunes, pero no de los daltónicos dicrómatas.
- Hipótesis 6. Versiones modificadas de la teoría clásica del contraste de conos (adaptadas a las características perceptivas de los daltónicos dicrómatas) permitirán explicar parcialmente las preferencias cromáticas de este tipo de daltónicos.
- Hipótesis 7. La actividad residual del mecanismo rojo-verde (Moreira et al., 2014) será relevante para explicar las preferencias del color en observadores dicrómatas, aunque el mecanismo rojo-verde será más relevante en observadores comunes.
- Hipótesis 8. La facilidad con la que se denomina un color, evaluada mediante tiempos de reacción, errores de denominación, consistencia intra-observador y consenso inter-observadores, se relacionará positivamente con las preferencias de los daltónicos dicrómatas.

iii. An Experimental Method (Simulcheck) for the Assessment of Colour Simulation Tools

1. Goals

- To design a method incorporating relevant variables to assess colour simulation tools. These variables will be based on two ways in which dichromat colour vision is different from normal colour vision: (1) The existence of pseudoachromatic stimuli and, (2) the variation in the magnitude of the response in the achromatic mechanism.
- To assess the suitability of this method on the basis of results produced by real dichromats responding to two types of stimulus sets, and to compare these results with the results predicted by applying the Brettel et al. (1997) algorithm.

- To assess the transformation tools through the application of the Simulcheck method to simulated dichromats, and comparing the results obtained with: (1) The transformation produced by applying the Brettel et al. (1997) algorithm; (2) The behaviour of real dichromats. To complement the assessment by analysing the colorimetric transformation produced by the tools.

2. Hypotheses

The designed method, Simulcheck, incorporates two dependent variables: h_{uv} and L_R . The first, h_{uv} , is the chromatic angle in the CIE $u'v'$ diagram and it is specified for the two types of pseudoachromatic stimuli (green and red). The second, L_R , is the relative luminance of those pseudoachromatic stimuli. The hypotheses related with these variables are similar for the two stimulus sets used (maximum chroma and constant chroma). The specific hypotheses for real dichromats and for the assessment of the colour simulation tools were:

- Hypothesis 1. Real protanopes and deuteranopes will differ in the h_{uv} and L_R adjusted values.
- Hypothesis 2. For the pseudoachromatic-greens and pseudoachromatic-reds, the h_{uv} values in real protanopes will correspond to counter clockwise variations (higher h_{uv} values) in relation to the real deuteranope h_{uv} values.
- Hypothesis 3. For the pseudoachromatic-greens the L_R values will be higher than 1 for real protanopes (higher lightness values adjusted, $> L^*$, in relation to common observers) and lower than 1 for real deuteranopes. The contrary will occur for the pseudoachromatic-reds.
- Hypothesis 4. The h_{uv} and L_R values corresponding to real dichromats will be similar to those predicted through the application of the Brettel et al. (1997) algorithm.
- Hypothesis 5. Different simulation tools (Variantor, Vischeck and Coblis) will produce different h_{uv} and L_R values in the simulated dichromats.
- Hypothesis 6. There will be a relationship between the colorimetric transformation produced by a simulation tool and the h_{uv} values resulting from applying Simulcheck

to the simulated dichromats. More specifically, the h_{uv} values produced by Simulcheck will correspond to stimuli low in saturation.

- Hypothesis 7. The assessment of the suitability of a simulation will produce similar results using the difference in h_{uv} and L_R values obtained in the simulated dichromats in relation to, alternatively, the produced values by real dichromats or the predicted values by the application of the Brettel et al. (1997) algorithm.

iv. Colour Preference in Red-Green Dichromats

1. Goals

- To describe the colour preference of red-green dichromats.
- To compare the colour preference of the two types of red-green dichromats (protanopes and deuteranopes) with the colour preference of common observers (males and females).
- To compare the colour preference of the two types of red-green dichromats: Protanopes and deuteranopes.
- To assess the colour preference in relation to the best exemplar of the basic colour categories (Lillo, Moreira, et al., 2014), both in common observers (males and females) and in red-green dichromats (protanopes and deuteranopes).
- To assess the ability of the classic cone contrast theory (Eskew et al., 1999) to explain the colour preference both in common observers and in red-green dichromats.
- To assess the ability of some variations of the classic cone contrast theory, incorporating the peculiarities of the red-green dichromats, to explain the preferences of these dichromat observers.
- To assess the ability of variables derived from the results of the colour naming task to explain the colour preference, both in common observers and in red-green dichromats.
- To assess if the residual activity of the red-green mechanism (Moreira et al., 2014) plays a significant role in the colour preference of red-green dichromats.

2. Hypotheses

- Hypothesis 1. The red-green dichromats will show colour preference patterns different from those of common observers.
- Hypothesis 2. Due to the reduced functionality of the red-green mechanism in red-green dichromats (Birch, 2001), it is expected that the differences in the colour preference of red-green dichromats and normal trichromats will appear especially in the red-green stimulus axis (and less for the yellow-blue stimulus axis).
- Hypothesis 3. Due to previous results on the effects of the perceptual peculiarities of red-green dichromats (Lillo, Moreira, et al., 2014; Pridmore, 2014), a greater difference is expected between common observers and protanopes than between common observers and deuteranopes.
- Hypothesis 4. There will be a higher preference for the best exemplars of the basic categories than for other stimuli.
- Hypothesis 5. The classic cone contrast theory (Eskew et al., 1999) will partially explain the colour preferences of common observers, but not the colour preference of red-green dichromats.
- Hypothesis 6. Modified versions of the classic cone contrast theory, tailored for the perceptual characteristics of red green-dichromats, will partially explain the colour preferences of red-green dichromats.
- Hypothesis 7. The residual activity of the red-green mechanism (Moreira et al., 2014) can be applied to explain the colour preference of red-green dichromats, but the red-green mechanism will be more applicable for common observers.
- Hypothesis 8. The ease of naming a colour, assessed through reaction times, naming errors, intra-observer consistency and the group consensus, will be positively related to the colour preference of red-green dichromats.

Capítulo 7. Conclusiones y Limitaciones - Conclusions and Limitations

i. Discusión y Conclusiones

El objetivo principal de esta tesis ha sido estudiar dos aspectos relacionados con los daltónicos dicrómatas que no han recibido atención previa en la literatura: (1) la evaluación de herramientas que simulan su visión del color y (2) sus preferencias de color. En relación con los objetivos específicos de esta tesis (véase [capítulo 6](#)), y a la luz de los resultados obtenidos (véanse [anexos](#)), podemos extraer las conclusiones que se describen para cada uno de los dos aspectos considerados.

Los datos de los daltónicos reales mostraron el comportamiento esperado en las dos tareas incluidas en Simulcheck. Esto es, produjeron valores de h_{uv} y L_R significativamente diferentes entre protanopes y deuteranopes (Hipótesis 1). Las diferencias se dieron en el sentido esperado tanto para la identificación de estímulos pseudoacromáticos (valores h_{uv} , Hipótesis 2) como para la luminancia relativa de estos (valores L_R , Hipótesis 3). Tales diferencias fueron, por otra parte, las mismas que permite predecir el algoritmo de Brettel et al. (1997; Hipótesis 4).

Tal y como se esperaba, se observaron importantes diferencias en los valores h_{uv} obtenidos al simular daltonismo dicrómata mediante las tres herramientas evaluadas (Hipótesis 5). Tales diferencias se relacionaron con los resultados observados en la evaluación colorimétrica de la transformación estimular producido por cada herramienta (Hipótesis 6). Más concretamente, la única herramienta que produjo resultados satisfactorios fue Vischeck. Esto es, los valores h_{uv} y L_R correspondientes a esta herramienta fueron muy similares a los de los dicrómatas reales, y también a los obtenidos utilizando el algoritmo de Brettel et al. (1997; Hipótesis 7).

En síntesis, aunque hoy por hoy sea fácil encontrar herramientas que dicen simular la visión cromática de protanopes y deuteranopes, nuestro análisis colorimétrico ha mostrado que tales herramientas difieren significativamente en los resultados que producen cuando

intentan imitar un determinado tipo de dicrómatas. Complementando lo anterior, los resultados producidos al aplicar el método Simulcheck mostraron que solo una de las herramientas evaluadas, Vischeck, producía simulaciones de color adecuadas. Este resultado es muy importante si se consideran las potenciales utilidades de las herramientas de simulación en el entorno del diseño universal (Vanderheiden & Jordan, 2012).

Los resultados obtenidos mostraron que el método Simulcheck es versátil, consistente y válido. Su versatilidad deriva de que permite, alternativamente, evaluar herramientas de simulación comparando dos de tres tipos de valores h_{uv} y L_R : (1) los derivados del algoritmo en el que teóricamente se basa la herramienta (cuando se dispone de tal información); (2) los que se basan en los ajustes empíricos de dicrómatas simulados obtenidos con la herramienta de simulación; (3) los que corresponden a los ajustes de los daltónicos dicrómatas reales.

Dependiendo de la información disponible sobre una herramienta de simulación (p. ej. conocer o no el algoritmo en el que se basa la herramienta) y de los posibles participantes en la investigación (p. ej. disponibilidad o no de daltónicos dicrómatas), el método permite realizar solo una o todas las comparaciones posibles mencionadas en el párrafo anterior.

La consistencia de Simulcheck deriva de que este método produce los mismos resultados independientemente del conjunto estimular utilizado. Simulcheck es, además, un método válido, pues la participación de daltónicos reales permitió comprobar que los dicrómatas reales proporcionaron los valores esperados en las variables estudiadas, que estiman la actividad del mecanismo amarillo-azul (h_{uv}) y claro-oscuro (L_R). Por su versatilidad, consistencia y validez, podemos concluir que Simulcheck puede considerarse un método muy adecuado para evaluar la adecuación de una herramienta de simulación.

Las tres herramientas de simulación evaluadas (Vischeck, Coblis y Variantor) difieren tanto respecto a la información que proporcionan (solo Vischeck explicita el algoritmo de transformación en el que se basa), como respecto al resultado de la evaluación obtenida usando Simulcheck. Concretamente, solo Vischeck pudo ser evaluado mediante las tres comparaciones que posibilita el método Simulcheck. En todas ellas mostró buenos

resultados. Más específicamente, los resultados empíricos obtenidos por dicrómatas reales fueron muy similares a los esperados a partir de las predicciones del algoritmo de transformación (Brettel et al., 1997) en el que se basa esta herramienta, por lo que puede concluirse que el algoritmo es válido. Por otra parte, los resultados de los dicrómatas reales también fueron similares a los obtenidos por observadores comunes utilizando Vischeck (dicrómatas simulados), y los de los dicrómatas simulados fueron similares a los esperados según el algoritmo de transformación. Sobre la base de todo lo anterior se puede concluir que la herramienta es precisa en la implementación del algoritmo y, dado que el algoritmo es válido, es también precisa la simulación realizada por esta herramienta.

Para las herramientas Variantor y Coblis solo fue posible la comparación basada en el comportamiento de dicrómatas reales y simulados. Los protanopes y deuteranopes simulados mediante el software Coblis realizaron ajustes muy diferentes a los de los dicrómatas reales, por lo que puede concluirse que el simulador Coblis no realiza simulaciones adecuadas. En relación a la única transformación realizada por Variantor, los dicrómatas simulados por estas gafas mostraron un comportamiento muy similar al de los protanopes reales.

Como ya se ha indicado, además de las comparaciones propias de Simulcheck, se realizó un análisis colorimétrico de las transformaciones realizadas por las tres herramientas evaluadas, cuyos resultados se compararon con la esperada a partir del algoritmo de transformación de Brettel et al. (1997). Tal algoritmo, recordamos, se mostró válido al predecir resultados similares a los obtenidos empíricamente con dicrómatas reales.

Los resultados colorimétricos para Vischeck fueron concordantes con las predicciones del algoritmo de Brettel et al. (1997): la transformación plegaba los estímulos en una recta con sus extremos cerca de $\lambda_D = 475$ y 575 nm. En el caso de Variantor, los estímulos no se plegaban en una recta, y en el caso de Coblis, los extremos de la recta se situaban lejos de lo esperado ($\lambda_D = 466.5$ y 571 nm). Puede concluirse por tanto que en relación con el algoritmo de Brettel et al. (1997), de las herramientas estudiadas en esta investigación solo Vischeck realizó una transformación colorimétrica adecuada.

En relación con el segundo estudio de esta tesis, nuestro estudio muestra que las preferencias del color de protanopes y deuteranopes son diferentes a las de observadores comunes (Hipótesis 1). Sin embargo, estas diferencias se dieron sobre todo en el eje estimular amarillo-azul, y no en el rojo-verde como podría esperar a partir de la reducida funcionalidad del mecanismo rojo-verde en daltónicos dicrómatas (Hipótesis 2). Estas diferencias respecto a los observadores comunes fueron mayores para protanopes que para deuteranopes (Hipótesis 3). Las preferencias del color mostradas hacia el conjunto de estímulos focales fueron generalmente más altas respecto a los otros conjuntos de estímulos en todos los grupos de observadores (Hipótesis 4).

La teoría clásica del contraste de conos explicó parcialmente las preferencias del color de tricrómatas comunes (Hipótesis 5), mientras que las de daltónicos dicrómatas fueron parcialmente explicadas mediante una versión modificada del mecanismo amarillo-azul (Hipótesis 6) con una contribución menor del mecanismo rojo-verde (Hipótesis 7). La facilidad de denominación de un color, en términos de velocidad, precisión, consistencia y consenso, también explicó parcialmente las preferencias del color en todos los grupos de observadores salvo en mujeres con visión normal (Hipótesis 8).

Las preferencias del color en observadores comunes han sido tema de estudio en los últimos años. Sin embargo, ninguna investigación se había ocupado de las preferencias del color en daltónicos dicrómatas. Esta tesis doctoral muestra de manera pionera que las preferencias del color de daltónicos dicrómatas, al igual que las de observadores comunes, son fiables, pero los patrones de preferencias de ambos grupos difieren en ciertos aspectos. Aunque dado que las mayores diferencias perceptivas entre tricrómatas y daltónicos dicrómatas se dan en el eje rojo-verde, cabría esperar mayores diferencias en dicho eje, los resultados muestran mayores diferencias en el eje amarillo-azul. Las similitudes en los patrones de preferencia fueron mayores para el conjunto de mejores ejemplares de las CCBs. Específicamente, para los conjuntos de colores saturado, claro y oscuro, similares a los utilizados en el estudio previo de Palmer y Schloss (2010), mientras los observadores comunes tanto en este estudio como en otros estudios previos, muestran mayores preferencias por los azulados y menores por los amarillos-verdosos, en los daltónicos dicrómatas de este

estudio se dan preferencias máximas para los amarillos y preferencias más débiles para los azules en comparación con los tricrómatas normales. Los protanopes fueron los que mostraron este patrón de manera más fuerte, mientras los deuteranopes mostraban un patrón intermedio entre los de observadores comunes y protanopes.

En relación a los mecanismos explicativos de las preferencias del color, se evaluó la teoría clásica de contraste de conos, excluyendo el conjunto de estímulos focales de este análisis para ofrecer resultados comparables a los de las investigaciones previas. Las preferencias del color de los tricrómatas comunes por los conjuntos saturado, claro y oscuro, fueron parcialmente explicadas por esta teoría, siendo $S-(L+M)$ el único predictor significativo. Al igual que en la investigación de Palmer y Schloss (2010), la varianza explicada fue alrededor de la mitad, por debajo de los tres cuartos de varianza explicados en el estudio de Hurlbert y Ling (2007).

La comparación los estudios mencionados mostró diferencias metodológicas en la selección estimular: mientras los conjuntos utilizados en el más reciente incluían estímulos que variaban en tono, saturación y claridad, los utilizados en el estudio de Hurlbert y Ling (2007) solo variaban principalmente en tono. Por este motivo, se decidió realizar tanto las regresiones con un grupo de estímulos más amplio y heterogéneo como en el estudio de Palmer y Schloss (2010), que incluía al mismo tiempo los conjuntos saturado, claro y oscuro, como regresiones con conjuntos más pequeños y homogéneos que solo variaran fundamentalmente en tono como en el estudio de Hurlbert y Ling (2007), para lo cual se analizaron los conjuntos saturado, claro y oscuro por separado.

Este nuevo análisis de los tres conjuntos por separado incrementó la varianza explicada a niveles similares a los hallados por Hurlbert y Ling (2007) e incluso mayores dependiendo del conjunto considerado. En estos análisis el mecanismo amarillo-azul continuó siendo el más relevante, mientras que $L-M$ fue un mecanismo relevante para las preferencias de los varones con visión normal del color en el conjunto de colores claros. Este dato es concordante con el estudio de Hurlbert y Ling (2007), pues también hallaron una contribución significativa del mecanismo $L-M$ solo para varones con visión normal y no

para mujeres, y su conjunto estimular presenta el mayor grado de similitud con el conjunto claro de este estudio (conjunto claro: $L^* \approx 80$; conjunto utilizado por el estudio de Hurlbert y Ling: $L^* \approx 77$).

En relación a la evaluación de la teoría clásica del contraste de conos con daltónicos dicrómatas, se produjeron los resultados esperados, careciendo tales mecanismos de poder explicativo. Sin embargo, la modificación el mecanismo amarillo-azul en valor absoluto explicó dos tercios de las preferencias del color en protanopes utilizando el conjunto completo de estímulos. Estos valores se incrementaron hasta los tres cuartos de varianza al analizar los tres conjuntos por separado en protanopes, pero $|S-(L+M)|$ no fue relevante para explicar las preferencias en deuteranopes. En este grupo de observadores, $L-M$ predijo la mitad de la varianza de las preferencias del color para el conjunto de estímulos claros, dato convergente con el de varones con visión normal en este estudio y en el de Hurlbert y Ling (2007) descrito en el párrafo anterior. Este resultado es una evidencia de la existencia de actividad residual del mecanismo rojo-verde en deuteranopes en la tarea de preferencias del color.

Las preferencias del color también fueron explicadas en términos de un modelo más acorde a la experiencia perceptiva (De Valois & De Valois, 1993; descrito en detalle en el [apartado 2.iii.5](#)). Independientemente de la versión del modelo utilizada (indiscriminada o discreta), los resultados fueron muy similares a los hallados utilizando la teoría clásica del contraste de conos, mostrando un mayor poder explicativo el mecanismo amarillo-azul que el rojo-verde para observadores comunes, y con ausencia de poder explicativo para daltónicos dicrómatas.

El análisis de las variables relacionadas con la denominación del color permitió hallar otro tipo de mecanismos explicativos totalmente novedosos si atendemos a la literatura especializada. Dichas variables fueron la velocidad de denominación, la precisión (errores computados en relación a la BCT que fue la moda de los observadores comunes), la consistencia inter-observador y el consenso inter-observadores, y todas ellas mostraron una relación significativa y positiva con las preferencias del color de los varones con visión

normal y con visión protanope y deuteranope, pero no para las mujeres con visión normal. Todas estas variables se relacionan con la fluencia de procesamiento (Reber, Wurtz, & Zimmermann, 2004; Winkelman, Halberstadt, Fazendeiro, & Catty, 2006), por lo que podría decirse que cuanto más fácil es denominar un color, mayor es la preferencia para ese estímulo.

ii. Limitaciones y Líneas de Investigación Futuras

En los artículos que describen los estudios realizados (véanse [anexos](#)) ya se han apuntado algunas de las limitaciones de esta tesis. En este apartado se describirán en detalle esas y otras limitaciones, además de indicar las líneas de investigación futuras.

En relación al estudio de la evaluación de herramientas que simulan la visión del color de daltónicos, las principales limitaciones y líneas de investigación futuras serían las siguientes:

1. Tamaño de la muestra: en este estudio participaron 10 dicrómatas (5 protanopes y 5 deuteranopes) y 10 tricrómatas normales. Aunque esta muestra es superior a algunos estudios previos con daltónicos dicrómatas (Bimler & Paramei, 2005; Boynton & Scheibner, 1967; Nagy & Boynton, 1979; Paramei, 1996) es indudable que una mayor muestra incrementaría la potencia estadística.
2. Muestreo estimular: aunque los dos conjuntos estimulares cubrían todo el círculo cromático y se utilizaron dos conjuntos estimulares con diferentes características colorimétricas, una reducción en el intervalo entre estímulos en h_{uv} permitiría evaluar con mayor precisión las herramientas de simulación. En esta línea, el uso de otro método psicofísico diferente (como el método del ajuste, bajo instrucciones de cancelación de tono o de igualación del punto acromático) podría incrementar dicha precisión (Pelli & Farell, 2010). También el uso de conjuntos estimulares con niveles de saturación menores podría mejorar la precisión al evaluar la bondad de ajuste de las herramientas en la simulación de los dicromatismos rojo-verde. Por otra parte, el conjunto de fondos acromáticos también podría mejorarse, aumentando el número de

fondos utilizados y reduciendo el tamaño de la distancia en L^* entre fondos (de forma similar a como hemos comentado previamente, la utilización del método del ajuste, bajo instrucciones de cancelación del contraste también podría incrementar la precisión de la medida). En relación a los dos conjuntos estímulares utilizados (croma máximo y croma constante), aunque la evaluación mediante uno u otro no ha producido conclusiones diferentes en esta investigación, sería más recomendable utilizar el conjunto de croma constante por no ser tan dependiente de la gama cromática del monitor utilizado para implementar el método. En síntesis, el uso de (1) conjuntos estímulares cromáticos, constantes a niveles menores de s_{uv} , y continuos en h_{uv} de manera que puedan ser ajustados por el propio dicrómata real o simulado, y de (2) un conjunto de fondos acromáticos también continuo, en los que L^* pueda ser ajustado por el observador, daría lugar a evaluaciones más precisas.

3. Tipo de tarea: La primera tarea de Simulcheck, “identificación de estímulos pseudoisocromáticos”, es relativamente sencilla debido a que la variación en la cercanía de los estímulos que se ven acromáticos se aprecia fácilmente (aparición de tonalidades). Además, tal tarea proporciona información muy relevante para comparar dicrómatas reales y simulados: los valores h_{uv} que producen respuestas mínimas (pseudoacromáticos verdes y rojos) en el mecanismo amarillo-azul. Sin embargo, la equivalencia en tales valores no asegura que una simulación sea adecuada para el resto de la actividad del mecanismo. Este resultado sería más probable si Simulcheck también incluyese una nueva tarea que produjese respuestas máximas (azules y amarillos de máximo croma) para los mismos valores h_{uv} que los que se produjeran en los dicrómatas reales. Determinar tales valores requeriría utilizar el conjunto estimular de croma constante y pedir a los dicrómatas (reales o simulados) que indicasen para qué estímulos experimentan colores más vivos (“identificación de estímulos de máximo croma percibido”). Sería muy plausible concluir que una herramienta es adecuada si proporciona valores h_{uv} adecuados tanto para los estímulos pseudoacromáticos, como para los de máximo cromatismo.
4. Tamaño estimular: el uso de un tamaño estimular de menos de 3° impidió la aparición de discriminación residual rojo-verde en los dicrómatas reales (véase no obstante el punto siguiente de presentación simultánea). Aunque esto es una infraestimación de

las capacidades de la visión cromática en algunos daltónicos dicrómatas, también puede considerarse adecuado utilizar este criterio conservador para evaluar herramientas de simulación. Si tales herramientas se utilizan para hacer diseño universal (Vanderheiden & Jordan, 2012), un criterio conservador conducirá a la selección de combinaciones cromáticas adecuadas para daltónicos dicrómatas con y sin actividad residual. Una clara línea de investigación futura sería utilizar diferentes tamaños estímulares para analizar su influencia sobre los resultados. Específicamente, sería interesante observar si hay alguna variación en las variables h_{uv} y L_R , principalmente en los dicrómatas reales. Estos resultados permitirían obtener información acerca de los mecanismos que permiten la discriminación residual rojo-verde en los daltónicos dicrómatas.

5. Presentación simultánea: la aparición de varios estímulos en la pantalla de manera simultánea ha podido influir sobre los resultados de la investigación como consecuencia de efectos como la inducción cromática y acromática. Además, podría haber facilitado la aparición de cierto grado de discriminación residual rojo-verde, pues el tamaño de varios estímulos simultáneos es mayor de 3° . Por ello, la presentación tanto de los estímulos cromáticos como de los fondos acromáticos de manera individual, realizando el dicrómata real o simulado una tarea de ajuste como la descrita en detalle en relación al muestreo estimular, permitiría un mayor control experimental al determinar las variables h_{uv} y L_R , también en lo que se refiere al tamaño estimular, y por tanto una mayor precisión en la evaluación de las herramientas de simulación.
6. Tipo de estímulos utilizados: los estímulos utilizados en la investigación son estímulos de pantalla de ordenador. Debe considerarse el uso de estímulos de superficie en papel, como los estímulos de los atlas NCS o Munsell, para evaluar las herramientas de simulación, pues esto podría influir en los ajustes realizados tanto por dicrómatas reales como simulados. En el caso de las herramientas ópticas esta variación no presentaría ningún tipo de dificultad para realizar la transformación, pues al igual que en los estímulos de pantalla de ordenador, la observación de los estímulos a través del filtro sería suficiente. Además el uso de estímulos de superficie ha sido recientemente recomendado en la página web de las gafas Variantor. Sin embargo,

para las herramientas tipo software la transformación sería poco recomendable, pues entrarían en juego variables contaminadoras como la impresión de los estímulos.

7. Inclusión de tricromatismos anómalos: aunque la población interés de esta tesis son los daltónicos dicrómatas, una posible línea de investigación futura sería la inclusión de tricrómatas anómalos reales. De hecho, algunas de las herramientas de simulación existentes (p. ej. Coblis) proponen simulaciones para protanomalia y deuteranomalia, y aunque la herramienta Variantor solo propone un tipo de simulación, también podría estudiarse el ajuste de la misma en relación a otras alteraciones de la visión del color. Sin embargo, esta línea futura entrañaría la dificultad derivada de la variación dentro de estas alteraciones de la visión del color (existen protanómalos y deuteranómalos simples y extremos, véase [apartado 3.i](#)).
8. Evaluación de otras herramientas: aunque las herramientas evaluadas en esta investigación son algunas de las más utilizadas, día tras día surgen nuevas herramientas de simulación del color. En el futuro sería interesante seleccionar algunas de ellas para evaluarlas con Simulcheck. Dado el gran número de herramientas existentes, el análisis previo de la transformación colorimétrica realizada podría orientar la selección de aquellas con mayor potencial para realizar simulaciones adecuadas.

En relación al estudio de las preferencias de color de los daltónicos dicrómatas, las principales limitaciones y líneas futuras serían las siguientes:

1. Muestreo estimular: aunque los resultados de denominación del color indican que todas las CCBs estaban representadas en el estudio (véase Tabla S1 en [anexos](#)), también muestran que algunas categorías (por ejemplo, azul) estaban mucho mejor representadas que otras (por ejemplo, rojo). Aunque estos resultados derivan en gran parte del volumen colorimétrico ocupado por diferentes categorías (azul ocupa un volumen mucho mayor que rojo en el espacio de color), esto puede influir en los patrones de preferencia encontrados. En el futuro sería interesante utilizar conjuntos estimulares mayores y con una representación más compensada de todas las categorías cromáticas.

2. Tamaño estimular: el tamaño estimular de más de 3° ha facilitado la aparición de discriminación residual rojo-verde en los deuteranopes que participaron en el estudio. Una clara línea de investigación futura sería utilizar diferentes tamaños estimulares para analizar su influencia sobre los patrones de preferencia de diferentes tipos de observadores. Específicamente, sería interesante observar si con estímulos de menos de 3° el mecanismo rojo-verde deja de tener influencia en las preferencias cromáticas de los deuteranopes. Asimismo, aunque esta y otras investigaciones realizan un estudio de las preferencias del color a nivel abstracto o general, es posible que algunos colores produzcan diferentes sensaciones estéticas dependientes del tamaño/uso del color (p. ej. el color que nos gusta para pintar una pared, puede no gustarnos para una camiseta). Un dato sorprendente de nuestra investigación es la aparición de actividad residual en deuteranopes pero no en protanopes, lo cual debe estudiarse en profundidad en investigaciones futuras.
3. Presentación secuencial: aunque la presentación individual permite un mayor control del tamaño estimular, esto impide estudiar las preferencias de color para combinaciones de colores. Aunque este tipo de investigación ha sido realizada en observadores normales (Ou et al., 2012), en el futuro debería considerarse replicar este tipo de estudio con presentación simultánea en daltónicos dicrómatas.
4. Modelos de la visión del color: aunque esta investigación ha sido pionera en el uso de otros modelos visuales (De Valois & De Valois, 1993) además de la teoría clásica del contraste de conos (Eskew et al., 1999) en el estudio de la preferencia del color, en futuras investigaciones sería interesante incorporar variables de los modelos de apariencia de color como CIECAM02 (véase [apartado 2.iii.5](#)).
5. Teoría de la valencia ecológica: como bien apunta Schloss (2015), los patrones de preferencia obtenidos en este estudio podrían ser también parcialmente explicados por la teoría de la valencia ecológica (Palmer & Schloss, 2010). En este estudio no evaluamos dicha teoría pues requiere la participación de cuatro grupos diferentes de observadores para realizar diferentes tareas, por lo que el número de daltónicos dicrómatas participantes en la tarea de preferencia se hubiera reducido sensiblemente. No obstante, en el futuro sería acertado incrementar la muestra para poder evaluar

también estas variables, y comprobar si la teoría de la valencia ecológica puede ser relevante para explicar las preferencias del color de daltónicos dicrómatas.

iii. Discussion and Conclusions

The main goal of this thesis was to study two areas of red-green dichromacy that have been previously neglected in the literature: (1) The assessment of tools that simulate this colour vision and (2) colour preferences in red-green dichromats. In relation to the specific goals of this thesis (see [chapter 6](#)), and in the light of the results (see [appendixes](#)), we can extract the following conclusions for each of the considered areas.

Real red-green dichromats data showed the expected behaviour in the two tasks included in Simulcheck. That is, significantly different h_{uv} and L_R values between protanopes and deuteranopes (hypothesis 1) were produced. The differences were in the expected direction both for the identification of pseudoachromatic stimuli (h_{uv} values, hypothesis 2) and for the relative luminance of that stimuli (L_R values, hypothesis 3). These differences were as predicted by the Brettel et al. (1997) algorithm (hypothesis 4).

As expected, there were critical differences in the h_{uv} values obtained by simulating red-green dichromacy through the three simulation tools (hypothesis 5). These differences were related to the observed results in the colorimetric evaluation of the stimulus transformation performed by each tool (hypothesis 6). More specifically, the only tool that produced satisfactory results was Vischeck. That is, the Vischeck's h_{uv} and L_R values were very similar to those produced by real dichromats and, also, to those obtained when using the Brettel et al. (1997) algorithm (hypothesis 7).

To summarize, although nowadays is easy to find tools that supposedly simulate the chromatic vision of protanopes and deuteranopes, our colorimetric analysis has shown that such tools significantly differ in the produced results when trying to simulate a specific type of dichromat. In addition to the above, the results produced by applying the Simulcheck method showed that only one of the assessed tools, Vischeck, produced a suitable simulation

of red-green dichromacy. This results is very important if we consider the potential use of these simulation tools within the universal design framework (Vanderheiden & Jordan, 2012).

The obtained results showed that the Simulcheck method is versatile, consistent, and valid. Its versatility derives from allowing the assessment of the simulation tools by alternatively comparing three types of values: (1) obtained from the algorithm in which the simulation tool is theoretically based (when this information is available); (2) based on the empirical adjustments of simulated dichromats obtained with the simulation tools; (3) corresponding to the adjustments performed by real dichromats.

Depending on the available information from a simulation tool (i.e. knowing or not knowing the information in which the simulation tool is based) and on the potential participants in the study (i.e. the availability or the non-availability of real red-green dichromats), the method allows performing only one or all the possible comparisons referred in the previous paragraph.

Simulcheck's consistency arises from the method providing the same results independently of the stimulus set used. Simulcheck is also valid, because the participation of real dichromats allowed checking that real dichromats provide the expected values in the measured variables that estimate the activity of the yellow-blue mechanism (h_{uv}) and the achromatic mechanism (L_R). Due to its versatility, consistency, and validity, we can conclude that Simulcheck can be considered a very suitable method for assessing the accuracy of the colour simulation tools.

The three simulation tools assessed (Vischeck, Coblis and Variantor) differ in respect to the information provided (only Vischeck makes explicit the algorithm in which it is based) and in the result of the assessment obtained by applying the Simulcheck method. Specifically, only Vischeck could be evaluated through the three possible comparisons using Simulcheck. In all of the three comparisons, Vischeck showed good results. More specifically, the empirical results obtained by real dichromats were very similar to the results expected from

the predictions of the transformation algorithm (Brettel et al., 1997) in which this tool is based, therefore it can be concluded that the algorithm is valid. The real dichromat results were also similar to the results obtained by common observers using Visccheck (simulated dichromats), and the results of simulated dichromats were similar to the results expected according to the transformation algorithm. On the basis of all these results, we can conclude that Visccheck is accurate in the implementation of the algorithm and, since the algorithm is also valid, Visccheck is also accurate in simulating red-green dichromacy.

For the tools Variantor and Coblis, it was only possible to compare the real dichromats and the simulated dichromats behaviour. The simulated protanopes and deuteranopes through the software Coblis performed very different adjustments in comparison to real dichromats, therefore it can be concluded that the Coblis simulator does not perform accurate simulations. In relation to the only transformation performed by Variantor, the simulated dichromats showed a behaviour very similar to the behaviour of real protanopes.

As it has been previously indicated, in addition to the Simulcheck comparisons, a colorimetric analysis of the transformations performed by the three assessed simulation tools was carried out. The results of this analysis were compared with the expected colorimetric transformation through the application of the transformation algorithm of Brettel et al. (1997), the algorithm which was earlier shown to be valid as it accurately predicted the empirical results of real red-green dichromats.

The colorimetric results for Visccheck were in good agreement with the predictions of the Brettel et al. (1997) algorithm: It transforms the stimuli in a straight line with one extreme near $\lambda_D = 475$ and the other extreme near 575 nm. In the case of Variantor, the stimuli are not transformed into a straight line, and in the case of Coblis the extremes of the straight line were far from the expected wavelengths ($\lambda_D = 466.5$ y 571 nm). Therefore it can be concluded that in comparison to the of the algorithm of Brettel et al. (1997), from the three simulation tools assessed in this research, only Visccheck performed a suitable colorimetric transformation.

In relation to the second study of this thesis dissertation, our study shows that the colour preference of protanopes and deuteranopes is different from the colour preference of common observers (hypothesis 1). However these differences were mostly in the yellow-blue stimulus axis, and not in the red-green stimulus axis as would be expected from the reduced functionality of the red-green mechanism in red-green dichromats (hypothesis 2). These differences in relation to common observers were higher for protanopes than for deuteranopes (hypothesis 3). Colour preference through the focal stimulus set was generally higher in all the groups of observers (hypothesis 4).

The classic cone contrast theory partially explained the colour preferences of common observers (hypothesis 5) while the colour preference of red-green dichromats were partially explained through a modified version of the yellow-blue mechanism (hypothesis 6) with a minor contribution of the red-green mechanism (hypothesis 7). The ease of colour naming, in terms of speed, accuracy, consistency and consensus, also partially explained the colour preference in all the groups of observers except for normal trichromatic females (hypothesis 8).

The colour preferences of common observers have been a well-studied issue during the last years. However, there has been no research on colour preference in red-green dichromats. This PhD thesis is the first to show that the colour preference ratings of red-green dichromats, like the colour preference ratings of common observers, are reliable, but that the colour preference patterns of these groups differ in some aspects. Given that the greatest perceptual differences between normal trichromats and red-green dichromats appear in the red-green axis, it would be expected that there would be more differences in the red-green axis, but the results show greater differences in the yellow-blue axis. The similarities in the colour preference patterns were higher for the set of best exemplars of the basic colour categories than for the saturated, light and dark sets, similar to the sets used in previous research by Palmer and Schloss (2010). Specifically for these three stimulus sets, while the common observers both in this and in previous research show higher preference ratings for the blue hues and lower for the yellow-green hues, the red-green dichromats of our study show the highest preference ratings for the yellow hues and weaker preference ratings for the

blue hues in comparison with the common trichromats. Protanopes showed this pattern in a strong way, while the deuteranopes showed an intermediate pattern between the common observers and protanopes patterns’.

To investigate the mechanisms underlying colour preference, the cone contrast theory was assessed. In order to provide results comparable with previous research the focal set was excluded from these analyses. Colour preferences of the common trichromats were partially explained by the cone contrast theory with $S-(L+M)$ being the only significant predictor. Similarly to the study by Palmer and Schloss (2010), the explained variance was found to be around half, below the three quarters of variance explained by the seminal study of Hurlbert and Ling (2007).

The comparison of these two studies showed methodological differences in the stimuli selection. While the stimulus sets used in the study by Palmer and Schloss (2010) included stimuli varying in hue, saturation and lightness, the stimuli used by Hurlbert and Ling (2007) mainly varied in hue. For this reason, it was decided to perform both regressions with a wider and more heterogeneous stimuli set including the saturated, light and dark sets (as in Palmer and Schloss, 2010) and regressions with a smaller and more homogeneous stimulus set mainly varying in hue (as in Hurlbert and Ling, 2007), by performing separate regressions with the saturated, light and dark sets.

These new separate analyses of the three sets increased the explained variance to similar levels of those previously found by Hurlbert and Ling (2007) with even higher explained variance depending on the stimulus set. In these analyses the yellow-blue mechanism was again found to be more explanatory, while $L-M$ was an important mechanism for the common trichromatic males in the light set. This result is in agreement with previous results by Hurlbert and Ling (2007). Specifically, they found a significant contribution of the $L-M$ mechanism but only for normal trichromatic males and not for normal trichromatic females. The stimulus set used in the Hurlbert and Ling’s (2007) study show the highest degree of similarity to the light set of the current study (light set: $L^* \approx 80$; set used in the study performed by Hurlbert and Ling: $L^* \approx 77$).

In relation to the assessment of the classic cone contrast theory with red-green dichromats; as expected these mechanisms could not explain red-green colour preference. However the absolute value of yellow-blue mechanism explained two thirds of the variance in the protanopes' colour preference using the saturated, light and dark sets together. The explained variance increased to three quarters when performing separate regressions for the three sets in protanopes, but $|S-(L+M)|$ was not very useful for explaining the colour preference patterns in deuteranopes. In this group, $L-M$ predicted a half of the variance of the colour preference for the light set, a converging result with $L-M$ partially explaining the variance in normal trichromatic males for this study and for the Hurlbert and Ling's (2007) study described in the previous paragraph. This result is evidence of the residual activity of red-green mechanism in deuteranopes in the colour preference task.

The colour preferences were also explained in terms of a model with better agreement with perceptual experience (De Valois & De Valois, 1993; fully described in [section 2.iii.5](#)). Irrespective of the model version used (indiscriminate or discrete), the results were very similar to those found by using the classic theory of cone contrast, showing a higher explanation power of the yellow-blue mechanism than of the red-green for common observers, and with absence of explanation power for red-green dichromats.

The analysis of the variables related to the colour naming allowed the discovery of novel explanatory mechanisms which has not been discussed in past literature. These variables were speed of naming, accuracy (errors were computed in relation to the basic colour terms that was the mode of the common observers), inter-observer consistency, and intra-observer consensus. All these variables showed a significant and positive relationship with colour preference of the males irrespective of their colour vision type (with normal trichromatic males, males with protanopia and males with deuteranopia) but not for the normal trichromatic females. All these variables are related to the processing fluency (Reber et al., 2004; Winkielman et al., 2006), so it can be said that the easier it is to name a colour, the more it is preferred.

iv. Limitations and Future Work

Limitations of this thesis have already been discussed in the manuscripts that describe the performed studies (see [appendixes](#)). In this section these limitations and other ones will be described in detail, as well as discussion of future lines of research.

In relation to the study of the assessment of colour simulation tools for red-green dichromats, the main limitations and future lines of research are as follows:

1. Sample size: In this study 10 dichromats (5 protanopes and 5 deuteranopes) and 10 normal trichromats took part. Although this sample size is higher than some previous studies with normal dichromats (Bimler & Paramei, 2005; Boynton & Scheibner, 1967; Nagy & Boynton, 1979; Paramei, 1996), it is doubtless that a higher sample size will improve the statistical power.
2. Stimulus sampling: Although the two stimulus sets covered the whole chromatic circle and both differed in colorimetric characteristics, a reduction in the between-stimulus interval in h_{uv} would allow to assess with higher accuracy the simulation tools. Along the same lines, the use of other psychophysical methods (like adjustment tasks, under instructions of hue nulling or chromatic matching) could increase the accuracy (Pelli & Farell, 2010). Also the use of stimulus sets with lower saturation levels could improve the accuracy by assessing the goodness of fit of the red-green dichromacy simulation tools. As well as this, the set of achromatic backgrounds could also be improved, by increasing the number of backgrounds used and decreasing the L^* distance between backgrounds. In a similar way as previously commented for the chromatic sets, the use of adjustment tasks, under instructions of contrast nulling could enhance the accuracy of the measurements. In relation to the two sets used, (maximum and constant chroma), although the assessment through one or other stimulus set did not led to different conclusions in this study, it would be recommended to use the constant chroma set because it is not so dependent of the screen gamut to implement the Simulcheck method. To summarize, using (1) two stimuli sets constant at lower levels of s_{uv} and continuous in h_{uv} which are adjusted by

- the real or simulated dichromat and (2) an achromatic background set also continuum in which L^* can be adjusted by the observer, would lead to more accurate assessments.
3. Task type: The current first task of Simulcheck, “pseudoachromatic stimuli identification”, is relatively easy because the variation near the stimuli seen as achromatic is easily detected (occurrence of hues). In addition, this task provides very important information for comparing real and simulated dichromats: the h_{uv} values producing minimum responses in the yellow-blue mechanism (pseudoachromatic greens and reds). However the equivalency of these values does not ensure the suitability of the simulation for the rest of the activity in the yellow-blue mechanism. This would be more likely to happen if the tool also produced the maximum response (blues and yellows with maximum chroma) for the same h_{uv} values as those of the real dichromats. To determine these values would require using the maximum chroma stimulus set and to ask dichromats (real or simulated) to indicate with which stimuli they experience the colours as more vivid (“maximum chroma stimulus identification”). It would be more likely to conclude that a tool is accurate if it provides suitable h_{uv} values both for the pseudoachromatic stimuli and for the maximum chroma stimuli.
 4. Stimulus size: using a stimulus size below 3° avoided the occurrence of red-green discrimination in the real dichromats (although see the next point about simultaneous presentation). Although this is an infra-estimation of the colour vision abilities of some red-green dichromats, it can be also considered appropriate to use this conservative criterion for assessing the simulation tools. If such tools are used for performing universal design (Vanderheiden & Jordan, 2012), a conservative criterion will lead to selecting suitable colour combinations for the red-green dichromats with and without residual activity. A clear line of future research is to use different stimulus sizes to analyse the influence of this variable on the results. Specifically, it would be interesting to see if there is any variation in the h_{uv} and L_R variables, mainly in the real dichromats. These results will allow us to obtaining information about the mechanisms allowing red-green residual discrimination in red-green dichromats.
 5. Simultaneous presentation: showing several stimuli simultaneously in the screen could affect the results of this study due to the effects of chromatic and achromatic

induction. In addition it could have facilitated the occurrence of certain red-green residual discrimination because the size of various stimuli showed simultaneously is bigger than 3° . For this reason, showing both the chromatic stimuli and the achromatic backgrounds individually, with the real or simulated dichromat performing an adjustment task (fully described in the stimulus sampling point), will allow a higher experimental control of the h_{uv} y L_R variables, and also in relation to the stimulus size, resulting in a higher accuracy in the assessment of the simulation tools.

6. Type of stimuli used: The stimuli used in this research were presented on a screen. It should be considered to use paper stimuli, like NCS or Munsell stimuli, to assess simulation tools because this could affect the adjustments performed by real and simulated dichromats. In relation to the optic simulation tools, this variation would not present any difficulty for the transformation, because observing the stimuli through the filters is sufficient for the transformation irrespective of if the stimuli is being presented on a screen or on paper. In addition, using surface stimuli has been recently recommend on the webpage of Variantor glasses. However for software simulation tools paper stimuli transformation is not recommended, because it will be influenced by other polluting variables like stimulus printing.
7. Including anomalous trichromatisms: although the population of interest for this thesis dissertation are red-green dichromats, a possible future research line would be to include real anomalous trichromats. In fact, some of the existing simulation tools (i.e. Coblis) propose simulations for protanomaly and deuteranomaly. Although Variantor only performs one transformation, the adjustment of such transformation in relation to other colour vision deficiencies can also be studied. However, this potential research would also include the variability within anomalous trichromatisms (there exists simple and extreme protanomalous and deuteranomalous, see [section 3.i](#)).
8. Assessment of other simulation tools: although the simulation tools assessed in this study are ones that are commonly used, everyday new simulation tools are proposed. In the future it would be interesting to select some of these new simulation tools to assess them with Simulcheck. Given the high number of existing tools, a previous

analysis of the colorimetric transformation could orient the selection of the tools with a higher potential to perform suitable simulations.

In relation to the study on colour preference of red-green dichromats, the main limitations and future research lines would be the following:

1. Stimuli sampling: although the colour naming results show that all the basic colour categories are represented in the study (see Table S1 in [Appendixes](#)), they also show that some categories (i.e. blue) were much better represented than others (i.e. red). Although these results partially derive from the colorimetric volume occupied by different categories (blue occupies a much bigger volume of the colour space than red), this could affect the colour preference pattern. In the future it would be interesting to use bigger stimulus sets with a more balanced representation of all the chromatic categories.
2. Stimulus size: The stimulus size bigger than 3° has facilitated the occurrence of red-green discrimination in the deuteranopes participating in our study. A clear line of future research would be using different stimulus sizes to analyse the influence of this variable in the colour preference patterns of different types of observers. Specifically, it would be interesting to see if with stimuli smaller than 3° the red-green mechanisms does not influence in the colour preference patterns of deuteranopes. Also although this and other research perform studies of colour preference at a general or abstract level, it is possible that some colours produce different aesthetic results depending of the size/use of the colour (i.e. the preferred colour for painting a wall could be not the same as for a t-shirt). A surprising result from our research is the influence of red-green residual activity in deuteranopes but not in protanopes, which should be deeply studied in future work.
3. Sequential presentation: Although the individual presentation of stimuli allows a higher experimental control of the stimulus size, this does not allow the capturing of colour preference in colour combinations. While this type of research has been performed in common observers (Ou et al., 2012), in the future it should be replicated with red-green dichromats.

4. Colour vision models: Even though this research was pioneering in using other visual models (De Valois & De Valois, 1993) than the classic cone contrast model (Eskew et al., 1999) for the study of colour preferences, in the future it would be interesting to incorporate variables from colour appearance models such as CIECAM02 (see [section 2.iii.5](#)).
5. Ecological valence theory: As noted in Schloss (2015), the colour preference patterns obtained in this study could be partially explained by the ecological valence theory (Palmer & Schloss, 2010). In this study, the ecological valence theory was not evaluated due to its sample requirements: it requires the participation of four different groups of observers for taking part in different tasks. Therefore the number of red-green dichromats in the colour preference task would have been significantly reduced. Nevertheless in the future it would be interesting to increase the sample size to assess the ecological valence theory in red-green dichromacy.

Referencias

- Álvaro, L., Moreira, H., Lillo, J., & Franklin, A. (2015). Color preference in red–green dichromats. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(30), 9316-9321. doi:10.1073/pnas.1502104112
- Ball, V. K. (1965). The aesthetics of color: A review of fifty years of experimentation. *Journal of Aesthetics & Art Criticism*, 23(4), 441-452. doi:10.2307/427666
- Bimler, D. L., & Paramei, G. V. (2005). Bezold-Brucke effect in normal trichromats and protanopes. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 22(10), 2120-2136.
- Birch, J. (1999). Performance of red-green color deficient subjects on the Holmes-Wright lantern (Type A) in photopic viewing. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 70(9), 897-901.
- Birch, J. (2001). *Diagnosis of defective colour vision*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Botstein, D. (1986). The molecular biology of color vision. *Science*, 232(4747), 142-143. doi:10.1126/science.2937146
- Boynton, R. M. (1979). *Human Color Vision*. New York: Holt, Rinehart and Winston.
- Boynton, R. M., & Scheibner, H. M. (1967). On the perception of red by red-blind observers. *Acta Chromatica*, 1, 205-220.
- Brettel, H., Viénot, F., & Mollon, J. D. (1997). Computerized simulation of color appearance for dichromats. *Journal of the Optical Society of America A*, 14(10), 2647-2655. doi:10.1364/JOSAA.14.002647
- Broackes, J. (2010a). Unilateral colour vision defects and the dimensions of dichromat experience. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 30(5), 672-684. doi:10.1111/j.1475-1313.2010.00774.x
- Broackes, J. (2010b). What do the colour-blind see? En J. D. Cohen & M. Matthen (Eds.), *Color Ontology and Color Science* (pp. 291-405). London: MIT Press.
- Byrne, A., & Hilbert, D. R. (2010). How do things look to de colour blind. En J. Cohen & M. Matthen (Eds.), *Color Ontology and Color Science* (pp. 259–290). London: MIT Press.

- Campbell, J. L., Spalding, J. A. B., & Mir, F. A. (2004). The description of physical signs of illness in photographs by physicians with abnormal colour vision. *Clinical and Experimental Optometry*, 87(4-5), 334-338. doi:10.1111/j.1444-0938.2004.tb05063.x
- Campbell, J. L., Spalding, J. A. B., Mir, F. A., & Birch, J. (2000). Doctors and the assessment of blood glucose testing sticks: does colour blindness matter? *British Journal of General Practice*, 50(454), 393-395.
- Capilla, P., Diez-Ajenjo, M. A., Luque, M. J., & Malo, J. (2004). Corresponding-pair procedure: a new approach to simulation of dichromatic color perception. *Journal of the Optical Society of America A*, 21(2), 176-186. doi:10.1364/JOSAA.21.000176
- Capilla, P., & Luque, M. J. (2002). La Trivarianza Visual. En P. Capilla, P. J. M. Artigas, & J. Pujol (Eds.), *Fundamentos de colorimetría* (pp. 13-30). Valencia, España: Universitat de València.
- CIE. (1932). *Commission internationale de l'Eclairage proceedings, 1931*. Cambridge, Estados Unidos: Cambridge University Press.
- CIE. (1964). *Proceedings 15th Session CIE, Vienna 1963, Vol. A*. Paris: Bureau Central de la CIE.
- CIE. (1978a). *Publication No. 41. Light as a true visual quantity: principles of measurement*. Paris: Bureau Central de la CIE.
- CIE. (1978b). *Recommendations on uniform colour spaces, colour difference equations, and psychometric terms. Suplemento No. 2 a la publicación No. 15*. Paris: Bureau Central de la CIE.
- CIE. (1990). *CIE 1988 2° Spectral luminous efficiency function for photopic vision. Publ. CIE n. 86*. Paris: Bureau Central de la CIE.
- CIE. (1999). *International recommendations for Colour Vision Requirements for Transport (Draft Standard ed.)*. Londres: CIE publicacions.
- Cole, B. L. (2002). Protan colour vision deficiency and road accidents. *Clinical and Experimental Optometry*, 85(4), 246-253. doi:10.1111/j.1444-0938.2002.tb03045.x
- Cole, B. L. (2004). The handicap of abnormal colour vision. *Clinical and Experimental Optometry*, 87(4-5), 258-275. doi:10.1111/j.1444-0938.1972.tb06271.x

- Cole, B. L., & Macdonald, W. A. (1988). Defective colour vision can impede information acquisition from redundantly colour-coded video displays. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 8(2), 198-210. doi:10.1111/j.1475-1313.1988.tb01038.x
- Cole, B. L., & Maddocks, J. D. (1997). Defective colour vision is a risk factor in driving. En C. R. Cavonius (Ed.), *Colour Vision Deficiencies XIII* (Vol. 59, pp. 471-481). Holanda: Springer.
- Choungourian, A. (1968). Color preferences and cultural variation. *Perceptual and Motor Skills*, 26(3c), 1203-1206. doi:10.2466/pms.1968.26.3c.1203
- Choungourian, A. (1969). Color preferences: A cross-cultural and crosssectional study. *Perceptual and Motor Skills*, 28(3), 801-802. doi:10.2466/pms.1969.28.3.801
- Dain, S. J., Wood, J. M., & Atchison, D. A. (2009). Sunglasses, traffic signals, and color vision deficiencies. *Optometry and Vision Science*, 86(4), e296-305. doi:10.1097/OPX.0b013e318199d1da
- Dalton, J. (1798). Extraordinary facts relating to the vision of colours. *Memoirs of the Literary and Philosophical Society of Manchester*, 5, 28-43.
- De Valois, R. L., & De Valois, K. K. (1993). A multi-stage color model. *Vision Research*, 33(8), 1053-1065. doi:10.1016/0042-6989(93)90240-W
- Eskew, R. T., McLellan, J. S., & Giulianini, F. (1999). Chromatic detection and discrimination. En K. R. Gegenfurtner & L. T. Sharpe (Eds.), *Color vision: From genes to perception* (pp. 345-368). Cambridge: Cambridge University Press.
- Eysenck, H. J. (1941). A critical and experimental study of color preferences. *The American Journal of Psychology*, 54(3), 385-394. doi:10.2307/1417683
- Fairchild, M. D. (2013). *Color Appearance Models* (3rd ed.). Chichester, UK: Wiley-IS&T.
- Farnsworth, D. (1957). *The Farnsworth-Munsell 100-Hue test for the examination of color vision*. Baltimore, Estados Unidos: Munsell Color Company.
- Fletcher, R. (1980). *The City University Colour Vision Test* (2nd ed.). Londres: Keeler.
- Fletcher, R., & Voke, J. (1985). *Defective Colour Vision*. Bristol, Reino Unido: Adam Hilger.
- Forte, J. D., Blessing, E. M., Buzás, P., & Martin, P. R. (2006). Contribution of chromatic aberrations to color signals in the primate visual system. *Journal of Vision*, 6(2), 97-105. doi:10.1167/6.2.1

- Frisby, J. P., & Stone, J. V. (2010). *Seeing: The computational approach to biological vision* (2nd ed.). Cambridge, MA: The MIT Press.
- Goodman, D. S. (2010). General Principles of Geometrical Optics. En M. Bass (Ed.), *Handbook of Optics* (Vol. 1, pp. 1.3-1.92). New York: McGraw-Hill.
- Graham, C. H., & Hsia, Y. (1958). Color defect and color theory; studies of normal and colorblind persons, including a subject color-blind in one eye but not in the other. *Science*, 127(3300), 675-682. doi:10.1126/science.127.3300.675
- Granger, G. W. (1952). Objectivity of Colour Preferences. *Nature*, 170(4332), 778-780. doi:10.1038/170778a0
- Grützner, P. (1972). Acquired Color Vision Defects. En D. Jameson & L. M. Hurvich (Eds.), *Visual Psychophysics* (pp. 643-659). Heidelberg, Alemania: Springer-Verlag.
- Guilford, J. P., & Smith, P. C. (1959). A system of color-preferences. *The American Journal of Psychology*, 72(4), 487-502. doi:10.2307/1419491
- Hardin, C. L. (1993). *Color for Philosophers: Unweaving the Rainbow* (Expanded ed.). Indianapolis: Hackett.
- Holmes, J. G., & Wright, W. D. (1982). A new colour-perception lantern. *Color Research and Application*, 7(2), 82-88. doi:10.1002/col.5080070204
- Humphrey, N. (1976). The colour currency of nature. En T. Porter & B. Mikellides (Eds.), *Colour for Architecture* (pp. 95-98). London: Studio-Vista.
- Hunt, B. J. (2005). *The Maxwellians*. Nueva York: Cornell University Press.
- Hunt, D. M., Dulai, K. S., Bowmaker, J. K., & Mollon, J. D. (1995). The Chemistry of John Dalton's Color-Blindness. *Science*, 267(5200), 984-988. doi:10.1126/science.7863342
- Hunt, R. W. G., & Pointer, R. (2011). *Measuring Colour* (4th ed.). Chichester, Reino Unido: Wiley-IS&T.
- Hurlbert, A. C., & Ling, Y. (2007). Biological components of sex differences in color preference. *Current Biology*, 17(16), R623-R625. doi:10.1016/j.cub.2007.06.022
- Hurvich, L. M. (1981). *Color vision*. Sunderland, Estados Unidos: Sinauer Associates.
- Hurvich, L. M., & Jameson, D. (1957). An opponent-process theory of color vision. *Psychological Review*, 64(6, Pt.1), 384-403.
- Ishihara, S. (1982). *Ishihara's Test for Colour Deficiencies*. Tokio: Kanehara Ltd.

- Jameson, D., & Hurvich, L. M. (1955). Some Quantitative Aspects of an Opponent-Colors Theory. I. Chromatic Responses and Spectral Saturation. *Journal of the Optical Society of America*, 45(7), 546-552. doi:10.1364/JOSA.45.000546
- Jameson, K. A., & Komarova, N. L. (2009). Evolutionary models of color categorization. I. Population categorization systems based on normal and dichromat observers. *Journal of the Optical Society of America A*, 26(6), 1414-1423. doi:10.1364/JOSAA.26.001414
- Jiang, J., Wang, Z., Luo, M. R., Melgosa, M., Brill, M. H., & Li, C. (2015). Optimum solution of the CIECAM02 yellow–blue and purple problems. *Color Research and Application*, 40(5), 491-503. doi:10.1002/col.21921
- Jordan, G., Deeb, S. S., Bosten, J. M., & Mollon, J. D. (2010). The dimensionality of color vision in carriers of anomalous trichromacy. *Journal of Vision*, 10(8), 12. doi:10.1167/10.8.12
- Judd, D. B. (1951). *Report of U.S. Secretariat Committee on Colorimetry and Artificial Daylight*. Paper presented at the Proceedings of the Twelfth Session of the CIE, Stockholm.
- Kaiser, P. K., & Boynton, R. M. (1996). *Human Color Vision*. Washington, DC: Optical Society of America.
- Kay, P., Berlin, B., Maffi, L., Merrifield, W. R., & Cook, R. (2009). *The World Color Survey*. Stanford: CSLI.
- Kinney, J. A., Paulson, H. M., & Beare, A. N. (1979). The ability of color defectives to judge signal lights at sea. *Journal of the Optical Society of America*, 69(1), 106-110. doi:10.1364/JOSA.69.000106
- Knoblauch, K., Saunders, F., Kusuda, M., Hynes, R., Podgor, M., Higgins, K. E., & de Monasterio, F. M. (1987). Age and illuminance effects in the Farnsworth-Munsell 100-hue test. *Applied Optics*, 26(8), 1441-1448. doi:10.1364/ao.26.001441
- Konstantakopoulou, E., Rodriguez-Carmona, M., & Barbur, J. L. (2012). Processing of color signals in female carriers of color vision deficiency. *Journal of Vision*, 12(2), 11-11. doi:10.1167/12.2.11

- Kraft, J. M., & Werner, J. S. (1994). Spectral efficiency across the life span: flicker photometry and brightness matching. *Journal of the Optical Society of America A*, 11(4), 1213-1221. doi:10.1364/JOSAA.11.001213
- Lanthony, P. (1985). *Album tritan*. Paris: Luneau Ophtalmologie.
- Le Grand, Y. (1972). Spectral Luminosity. En D. Jameson & L. M. Hurvich (Eds.), *Visual Psychophysics* (Vol. 7 / 4, pp. 413-433): Springer Berlin Heidelberg.
- Lillo, J. (1993). *Psicología de la Percepción*. Madrid: Debate.
- Lillo, J. (1996). *Manual del test de identificación de daltonismos (TIDA)*. Madrid: TEA.
- Lillo, J. (1999). Percepción del Color. En E. Munar, J. Roselló, & A. S. Cabaco (Eds.), *Atención y percepción* (pp. 301-338). Madrid: Alianza.
- Lillo, J. (2000). *Ergonomía. Evaluación y diseño del entorno visual*. Madrid: Alianza.
- Lillo, J., Álvaro, L., & Moreira, H. (2014). An experimental method for the assessment of color simulation tools. *Journal of Vision*, 14(8), 15. doi:10.1167/14.8.15
- Lillo, J., Collado, J. A., Del Valle, R., & Sánchez López, M. P. (1995). Color, contraste y diseño ergonómico (I): La Percepción del Color. *Factores Humanos*, 9, 47-57.
- Lillo, J., & Moreira, H. (2004). Color blindness. En C. D. Spilberger (Ed.), *Encyclopedia of Applied Psychology* (Vol. 1, pp. 411-420). Nueva York: Elsevier Academic Press.
- Lillo, J., & Moreira, H. (2005). Relative luminance and figure-background segmentation problems: Using AMLA to avoid no-discernible stimuli pairs in common and colour blind observers. *Psicologica*, 26(2), 189-207.
- Lillo, J., & Moreira, H. (2013). *Percepción del color y daltonismos: Descripción, diagnóstico e intervención*. Madrid: Pirámide.
- Lillo, J., Moreira, H., Álvaro, L., & Davies, I. R. L. (2014). Use of basic color terms by red-green dichromats: 1. General description. *Color Research and Application*, 39(4), 360-371. doi:10.1002/col.21803
- Lillo, J., Moreira, H., Álvaro, L., & Majarín, D. (2013). Lighting and work: Light for seeing and healthy light. *Psychology*, 4(1), 11-38. doi:10.1174/217119713805088298
- Lillo, J., Moreira, H., Álvaro, L., & Sánchez, M. (en prensa). Ambiente físico y displays 1: aspectos generales e iluminación. En A. L. García-Izquierdo (Ed.), *Manual de Ergonomía y Psicosociología Aplicada a la Prevención de Riesgos Laborales*. Oviedo, España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo.

- Lillo, J., Moreira, H., Pérez del Tío, L., Álvaro, L., & Durán, M. C. (2013). Basic Color Terms Use by Aged Observers: Lens Aging and Perceptual Compensation. *The Spanish journal of psychology*, 15(2), 453-470. doi:10.5209/rev_SJOP.2012.v15.n2.38856
- Lillo, J., Moreira, H., Vitini, I., & Martín, J. (2007). Locating basic Spanish colour categories in CIE L*u*v* space: Identification, lightness segregation and correspondence with English equivalents. *Psicologica*, 28(1), 21-54.
- Loughman, J., Davison, P. A., Nolan, J. M., Akkali, M. C., & Beatty, S. (2010). Macular pigment and its contribution to visual performance and experience. *Journal of Optometry*, 3(2), 74-90. doi:10.1016/S1888-4296(10)70011-X
- McIntyre, D. (2002). *Colour Blindness: Causes and Effects*. Reino Unido: Dalton Publishing.
- McManus, I. C., Jones, A. L., & Cottrell, J. (1981). The aesthetics of colour. *Perception*, 10(6), 651-666. doi:10.1068/p100651
- Melgosa, M., Huertas, R., & Berns, R. S. (2004). Relative significance of the terms in the CIEDE2000 and CIE94 color-difference formulas. *Journal of the Optical Society of America A*, 21(12), 2269-2275. doi:10.1364/JOSAA.21.002269
- Melgosa, M., Huertas, R., & Hita, E. (2006). Problemas de aprendizaje derivados de la visión defectiva del color: un ejemplo práctico. *Revista de Educación*, 340, 713-729.
- Mollon, J. D. (2003). The Origins of Modern Color Science. En S. K. Shevell (Ed.), *The Science of Color* (2nd ed., pp. 1-39). Oxford, Reino Unido: Optical Society of America.
- Montag, E. D. (1994). Surface color naming in dichromats. *Vision Research*, 34(16), 2137-2151. doi:10.1016/0042-6989(94)90323-9
- Montag, E. D., & Boynton, R. M. (1987). Rod influence in dichromatic surface color perception. *Vision Research*, 27(12), 2153-2162. doi:10.1016/0042-6989(87)90129-5
- Montanero, M., Díaz, M. F., Pardo, P. J., Palomino, M. I., Gil, J., Pérez, A. L., & Suero, M. I. (2003). Daltonismo y Rendimiento Escolar en la Educación Infantil. *Revista de Educación*, 330, 449-462.

- Moreira, H., Lillo, J., Álvaro, L., & Davies, I. R. L. (2014). Use of basic color terms by red-green dichromats. II. Models. *Color Research and Application*, 39(4), 372-386. doi:10.1002/col.21802
- Morland, A. B., & Ruddock, K. H. (1993). Variations in colour matching data associated with light losses in the macular pigment. En B. Drum (Ed.), *Colour Vision Deficiencies XI* (Vol. 56, pp. 427-435). Holanda: Springer.
- Nagel, W. (1905). Dichromatische Fovea, trichromatische Peripherie. *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*, 39, 93-101.
- Nagy, A. L., & Boynton, R. M. (1979). Large-Field Color Naming of Dichromats with Rods Bleached. *Journal of the Optical Society of America*, 69, 1259-1265. doi:10.1364/JOSA.69.001259
- Nakauchi, S., & Onouchi, T. (2008). Detection and modification of confusing color combinations for red-green dichromats to achieve a color universal design. *Color Research and Application*, 33(3), 203-211. doi:10.1002/col.20404
- Nassau, K. (2003). The Physics and Chemistry of Color: the 15 Mechanisms. En S. K. Shevell (Ed.), *The Science of Color* (2nd ed., pp. 247-280). Oxford, Reino Unido: Optical Society of America.
- Nathans, J. (1987). Molecular biology of visual pigments. *Annual Review of Neuroscience*, 10, 163-194. doi:10.1146/annurev.ne.10.030187.001115
- Nathans, J. (1989). The genes for color vision. *Scientific American*, 260(2), 42-49.
- Nathans, J., Piantanida, T. P., Eddy, R. L., Shows, T. B., & Hogness, D. S. (1986). Molecular genetics of inherited variation in human color vision. *Science*, 232(4747), 203-210. doi:10.1126/science.3485310
- Neitz, J., & Neitz, M. (2011). The genetics of normal and defective color vision. *Vision Research*, 51(7), 633-651. doi:10.1016/j.visres.2010.12.002
- Nimeroff, I. (1970). The deuteranopic convergence point. *Journal of the Optical Society of America*, 60(7), 966-969. doi:10.1364/JOSA.60.000966
- Ou, L., Luo, M. R., Sun, P., Hu, N.-C., Chen, H., Guan, S., . . . Richter, K. (2012). A cross-cultural comparison of colour emotion for two-colour combinations. *Color Research and Application*, 37(1), 23-43. doi:10.1002/col.20648

- Ou, L., Luo, M. R., Woodcock, A., & Wright, A. (2004a). A study of colour emotion and colour preference. Part I: Colour emotions for single colours. *Color Research and Application*, 29(3), 232-240. doi:10.1002/col.20010
- Ou, L., Luo, M. R., Woodcock, A., & Wright, A. (2004b). A study of colour emotion and colour preference. Part III: Colour preference Modeling. *Color Research and Application*, 29(5), 381-389. doi:10.1002/col.20047
- Packer, O., & Williams, D. R. (2003). Light, the Retinal Image, and Photoreceptors. En S. K. Shevell (Ed.), *The Science of Color* (2nd ed., pp. 41-102). Oxford, Reino Unido: Optical Society of America.
- Palmer, S. E., & Schloss, K. B. (2010). An ecological valence theory of human color preference. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(19), 8877-8882. doi:10.1073/pnas.0906172107
- Paramei, G. V. (1996). Color Space of Normally Sighted and Color-Deficient Observers Reconstructed from Color Naming. *Psychological science*, 7(5), 311-317. doi:10.2307/40062968
- Pelli, D. G., & Farell, B. (2010). Psychophysical methods. En M. Bass, C. DeCusatis, J. Enoch, V. Lakshminarayanan, G. Li, C. MacDonald, V. Mahajan, & E. V. Stryland (Eds.), *Handbook of Optics* (3rd ed., Vol. III: Vision and Vision Optics, pp. 3.1-3.12). New York: McGraw-Hill.
- Pitt, F. H. G. (1935). *Characteristics of dichromatic vision. Medical Research Council Special Report Series, 200*. Londres: His Majesty's Stationery Office.
- Pridmore, R. W. (2014). Orthogonal Relations and Color Constancy in Dichromatic Colorblindness. *Plos One*, 9(9), e107035. doi:10.1371/journal.pone.0107035
- Ramaswamy, S., & Hovis, J. K. (2011). Does Dichromatic Color Simulation Predict Color Identification Error Rates? *Optometry and Vision Science*, 88(5), 621-627. doi:10.1097/Opx.0b013e31821bfb68
- Reber, R., Wurtz, P., & Zimmermann, T. D. (2004). Exploring “fringe” consciousness: The subjective experience of perceptual fluency and its objective bases. *Consciousness and Cognition*, 13(1), 47-60. doi:10.1016/S1053-8100(03)00049-7
- Rosenthal, O., & Phillips, R. H. (1997). *Coping with Color-Blindness*. Garden City Park, Nueva York: Avery Publishing Group.

- Sagawa, K., & Takahashi, Y. (2001). Spectral luminous efficiency as a function of age. *Journal of the Optical Society of America A*, 18(11), 2659-2667. doi:10.1364/JOSAA.18.002659
- Saito, M. (1994). A cross-cultural study on color preference in three Asian cities Comparison between Tokyo, Taipei and Tianjin. *Japanese Psychological Research*, 36(4), 219-232. doi:10.4992/psycholres1954.36.219
- Saito, M. (1996). A comparative study of color preferences in Japan, China and Indonesia, with emphasis on the preference for white. *Perceptual and Motor Skills*, 83(1), 115-128. doi:10.2466/pms.1996.83.1.115
- Scheibner, H. M., & Boynton, R. M. (1968). Residual red-green discrimination in dichromats. *Journal of the Optical Society of America*, 58(8), 1151-1158. doi:10.1364/JOSA.58.001151
- Schloss, K. B. (2015). Color Preferences Differ with Variations in Color Perception. *Trends in Cognitive Sciences*, in press. doi:10.1016/j.tics.2015.08.009
- Schmidt, B. P., Neitz, M., & Neitz, J. (2014). Neurobiological hypothesis of color appearance and hue perception. *Journal of the Optical Society of America A*, 31(4), A195-207. doi:10.1364/JOSAA.31.00A195
- Shannon, R., & Johannes, J. D. (1976). Systems simulation: the art and science. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 6(10), 723-724.
- Sharpe, L. T., Stockman, A., Jägle, H., & Nathans, J. (1999). Opsin genes, cone photopigments, color vision, and color blindness. En K. R. Gegenfurtner & L. T. Sharpe (Eds.), *Color vision* (pp. 3-51). Cambridge, Estados Unidos: Cambridge University Press.
- Shevell, S. K. (2003). Color Appearance. En S. K. Shevell (Ed.), *The Science of Color* (2nd ed., pp. 149-190). Oxford, Reino Unido: Optical Society of America.
- Smith, V. C., & Pokorny, J. (1972). Spectral sensitivity of color-blind observers and the cone photopigments. *Vision Research*, 12(12), 2059-2071. doi:10.1016/0042-6989(72)90058-2
- Smith, V. C., & Pokorny, J. (1975). Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm. *Vision Research*, 15(2), 161-171. doi:10.1016/0042-6989(75)90203-5

- Smith, V. C., & Pokorny, J. (1977). Large-field trichromacy in protanopes and deuteranopes. *Journal of the Optical Society of America*, 67(2), 213-220. doi:10.1364/JOSA.67.000213
- Smith, V. C., & Pokorny, J. (2003). Color matching and color discrimination. En S. K. Shevell (Ed.), *The Science of Color* (2nd ed., pp. 103-148). Oxford, Reino Unido: Optical Society of America.
- Spalding, J. A. B. (1997). Doctors with inherited colour vision deficiency: their difficulties in clinical work. En C. R. Cavonius (Ed.), *Colour Vision Deficiencies XIII* (Vol. 59, pp. 483-489). Holanda: Springer.
- Spalding, J. A. B., Cole, B. L., & Mir, F. A. (2010). Advice for medical students and practitioners with colour vision deficiency: a website resource. *Clinical and Experimental Optometry*, 93(1), 39-41. doi:10.1111/j.1444-0938.2009.00434.x
- Sperling, H. G. (1991). Vulnerability of the blue-sensitive mechanism. En D. H. Foster (Ed.), *Inherited and Acquired Colour Vision Deficiencies: Fundamental Aspects and Clinical Studies* (pp. 72-87). Boston: CRC Press.
- Steward, J. M., & Cole, B. L. (1989). What do color vision defectives say about everyday tasks? *Optometry and Vision Science*, 66(5), 288-295.
- Stockman, A., MacLeod, D. I. A., & Johnson, N. E. (1993). Spectral sensitivities of the human cones. *Journal of the Optical Society of America A*, 10(12), 2491-2521. doi:10.1364/JOSAA.10.002491
- Tagarelli, A., Piro, A., Tagarelli, G., Lantieri, P. B., Risso, D., & Olivieri, R. L. (2004). Colour blindness in everyday life and car driving. *Acta Ophthalmologica Scandinavica*, 82(4), 436-442. doi:10.1111/j.1395-3907.2004.00283.x
- Taylor, C., Clifford, A., & Franklin, A. (2013). Color preferences are not universal. *Journal of Experimental Psychology: General*, 142(4), 1015-1027. doi:10.1037/a0030273
- Taylor, C., & Franklin, A. (2012). The relationship between color-object associations and color preference: Further investigation of ecological valence theory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 19(2), 190-197. doi:10.3758/s13423-012-0222-1
- Torrents, A., Bofill, F., & Cardona, G. (2011). Suitability of school textbooks for 5 to 7 year old children with colour vision deficiencies. *Learning and Individual Differences*, 21(5), 607-612. doi:10.1016/j.lindif.2011.07.004

- Vanderheiden, G. C., & Jordan, J. B. (2012). Design for People with Functional Limitations. En G. Salvendy (Ed.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics* (4th ed., pp. 1407-1441): John Wiley & Sons, Inc.
- Verriest, G. (1963). Further studies on acquired deficiency of color discrimination. *Journal of the Optical Society of America*, 53(1), 185-195. doi:10.1364/JOSA.53.000185
- Viénot, F., Brettel, H., Ott, L., Ben M'Barek, A., & Mollon, J. D. (1995). What Do Color-Blind People See. *Nature*, 376(6536), 127-128. doi:10.1038/376127a0
- Vingrys, A. J. (2002). The case against protan drivers holding professional driving licenses. *Clinical and Experimental Optometry*, 85(1), 46-48. doi:10.1111/j.1444-0938.2002.tb03072.x
- Wachtler, T., Dohrmann, U., & Hertel, R. (2004). Modeling color percepts of dichromats. *Vision Research*, 44(24), 2843-2855. doi:10.1016/j.visres.2004.06.016
- Wasserman, G. S. (1978). *Color Vision: An Historical Introduction*. Nueva York: John Willey & Sons.
- Winkielman, P., Halberstadt, J., Fazendeiro, T., & Catty, S. (2006). Prototypes are attractive because they are easy on the mind. *Psychological science*, 17(9), 799-806. doi:10.1111/j.1467-9280.2006.01785.x
- Wright, W. D. (1946). *Researches on normal and defective colour vision*. Londres: Henry Kimpton.
- Wright, W. D. (1952). The characteristics of tritanopia. *Journal of the Optical Society of America*, 42(8), 509-521. doi:10.1364/JOSA.42.000509
- Wysecki, G., & Stiles, W. S. (1982). *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae* (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons.

Anexos – Appendixes

An experimental method for the assessment of color simulation tools

Julio Lillo

Departamento de Psicología Diferencial y del Trabajo,
Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Spain



Leticia Álvaro

Departamento de Psicología Diferencial y del Trabajo,
Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Spain



Humberto Moreira

Departamento de Psicología Diferencial y del Trabajo,
Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Spain



The Simulcheck method for evaluating the accuracy of color simulation tools in relation to dichromats is described and used to test three color simulation tools: Variantor, Coblis, and Vischeck. A total of 10 dichromats (five protanopes, five deuteranopes) and 10 normal trichromats participated in the current study. Simulcheck includes two psychophysical tasks: the Pseudoachromatic Stimuli Identification task and the Minimum Achromatic Contrast task. The Pseudoachromatic Stimuli Identification task allows determination of the two chromatic angles (h_{uv} values) that generate a minimum response in the yellow–blue opponent mechanism and, consequently, pseudoachromatic stimuli (greens or reds). The Minimum Achromatic Contrast task requires the selection of the gray background that produces minimum contrast (near zero change in the achromatic mechanism) for each pseudoachromatic stimulus selected in the previous task (L_R values). Results showed important differences in the colorimetric transformations performed by the three evaluated simulation tools and their accuracy levels. Vischeck simulation accurately implemented the algorithm of Brettel, Viénot, and Mollon (1997). Only Vischeck appeared accurate (similarity in h_{uv} and L_R values between real and simulated dichromats) and, consequently, could render reliable color selections. It is concluded that Simulcheck is a consistent method because it provided an equivalent pattern of results for h_{uv} and L_R values irrespective of the stimulus set used to evaluate a simulation tool. Simulcheck was also considered valid because real dichromats provided expected h_{uv} and L_R values when performing the two psychophysical tasks included in this method.

Introduction

Most human beings are trichromats. They have three different retinal cones and need a minimum of three primaries to match any color. Some people (slightly above 2% of males; Sharpe, Stockman, Jägle, & Nathans, 1999) are, as are most mammals (Hemmi, James, & Taylor, 2002; Vorobyev, 2004), dichromats. They have only two cone types and require a minimum of two primary colors for matching any color. The clinical denominations of dichromatism (protanopia, deuteranopia, and tritanopia) specify the absent cone type (*proto*, *deutera*, and *trita* mean first, second, and third, respectively, in Greek). In the standard scientific nomenclature (Carroll, Neitz, & Neitz, 2002; Hunt & Pointer, 2011, chapter 1; Lewis & Zhaoping, 2006) such cones are frequently identified as “L,” “M,” and “S” because they are relatively more sensitive to long, medium, and short wavelengths, respectively.

Chromatic stimuli frequently improve visual memory performance for both normals and dichromats (Gegenfurtner, Wichmann, & Sharpe, 1998; Spence, Wong, Rusan, & Rastegar, 2006; Velisavljević & Elder, 2008). Color variations are frequently used to facilitate some visual tasks (Breslow, Trafton, & Ratwani, 2009; Yamani & McCarley, 2010). They include the localization (Remington, Johnston, Ruthruff, Gold, & Romera, 2000) and identification (Spence, Kutlesa, & Rose, 1999) of some kind of information. Hue changes (color qualitative changes) are especially accurate for supporting identification tasks on complex visualizations (categorization, absolute numeric value judgments, etc.), whereas ordered lightness or saturation scales are superior for relative comparison tasks (differentiation between greater or lesser amounts of

Citation: Lillo, J., Álvaro, L., & Moreira, H. (2014). An experimental method for the assessment of color simulation tools. *Journal of Vision*, 14(8):15, 1–19, <http://www.journalofvision.org/content/14/8/15>, doi:10.1167/14.8.15.

something; Breslow et al., 2009). All the previously mentioned color uses (localization, identification, categorization, etc.) require seeing different colors in response to the stimuli used for representing different things.

Dichromats have more metamers than do normal trichromats (Lillo & Moreira, 2004); that is, they see the same color when responding to stimuli only differentiable thanks to the activity in the absent cone (L for protanopia, M for deuteranopia). According to clinical nomenclature (Birch, 2001; Fletcher & Voke, 1985), pseudoisochromatic stimuli are perceived as the same color by some people (i.e., protanopes or deuteranopes) but as different colors by normal people. Such stimuli are frequently used in classical color clinical diagnosis tests (Birch, 2001) and in the tests designed to be applied using new gadgets, such as different screen types (Pardo, Pérez, & Suero, 2001, 2004) and handheld game console displays (Suero, Pardo, & Pérez, 2010). Of course, new gadgets also can be used for performing everyday tasks requiring color differentiation or categorization, and the presence of pseudoisochromatic stimuli is a possible source of problems (Lillo & Moreira, 2013, chapter 5). For example, if red backgrounds are used to indicate some kind of emergency, their localization would be more difficult for people confusing such reds with other colors used.

According to the universal design framework (Vanderheiden, 2006), things and environments must be designed to allow easy use by normal and disabled people. In relation to color (Lillo & Moreira, 2013, chapter 5) the main goal of universal design is to promote similar, accurate uses by people with and without normal color perception. For example, when designing a political map its colors must be differentiable both for normals and dichromats. If we use an accurate color simulation tool, it will be easy to reach this goal.

Color simulation tools transform colors (original colors) to make them similar to the ones that people who are color blind presumably see (transformed colors). Most of the times, color transformation is done using some kind of software (Capilla, Díez-Ajenjo, Luque, & Malo, 2004; Luque, Fez, & Acevedo, 2014; Viénot, Brettel, & Mollon, 1999). Alternatively, optic filtering can be used (<http://www.variantor.co.uk/page.php?sub=2&id=2>). Colors differing in the original image but similar in the transformed one are considered pseudoisochromatic. Some simulation tools incorporate a “daltonization function” (Nakauchi & Onouchi, 2008) to avoid pseudoisochromatic colors selectively changing some colors in the original image. Along the same lines, the CIE (International Commission on Illumination) technical committee TC1-89 (<http://www.cie.co.at/index.php/Technical+Committees>) has been

created to “study, evaluate, and recommend image enhancing techniques for color defective observers.”

Color simulation tools assume (implicit or explicitly) a “reduction view” theoretical framework (Broackes, 2010b; Byrne & Hilbert, 2010; Logvinenko, 2014) based on the following two premises: (1) Dichromats see only a subset of the colors experienced by normal trichromats and (2) there are pseudometameric (pseudoisochromatic) stimuli groups—that is, groups of stimuli that produce different colors (C_{11} , C_{12} , ..., C_{1n}) for people with normal color vision but only one color (C'_1) for dichromats (i.e., Vischeck is based on the algorithm of Brettel, Viénot, & Mollon, 1997).¹ From the two previous premises, differences between color simulation tools can appear about (1) the stimuli included in each pseudoisochromatic group and (2) the color perceived when seeing any stimulus included in a specific pseudoisochromatic group. As will be shown, this last aspect is not relevant when making universal design.

When red–green dichromats (protanopes or deuteranopes) do a Rayleigh match (Birch, 2001, p. 53), the colors they perceive when seeing any mix of the green (545 nm) and the red (670 nm) lights can be matched by the yellow (589 nm, orangish-yellow) light adjusted to a specific intensity. This means that, for these dichromats, some pseudoisochromatic stimuli include lights that belong to very different color categories (red, orange, green, or yellow) for normal people. Consequently, such lights must not be used to symbolize different things (for example, different power levels in a mobile phone) regardless of the specific color seen by the dichromats. In conclusion, the key aspect when evaluating a color simulation tool is to know if it creates pseudoisochromatic stimuli groups equal to the ones existing in the simulated dichromat type. The notorious differences existing between the colors provided by different simulation tools (i.e., in lightness level) for the same type of dichromat make obvious that some tools do not work accurately.

Our main research goal was the design and evaluation of a method, Simulcheck, that aims to be useful for evaluating color simulation tools. Data collected in this research allow comparisons between real dichromats, simulation tools (Vischeck, Variantor, and Coblis), and a dichromat’s color appearance algorithm (Brettel et al., 1997; see Footnote 1). On one hand, as is usually the case, there was no information about the algorithm that supposedly was used by two simulation tools (Variantor and Coblis). Therefore, we took colorimetric measurements on the transformation performed by each tool. On the other hand, such information was available for Vischeck (based on Brettel et al., 1997; see Footnote 1), making it possible to test the algorithm’s implementation accuracy.

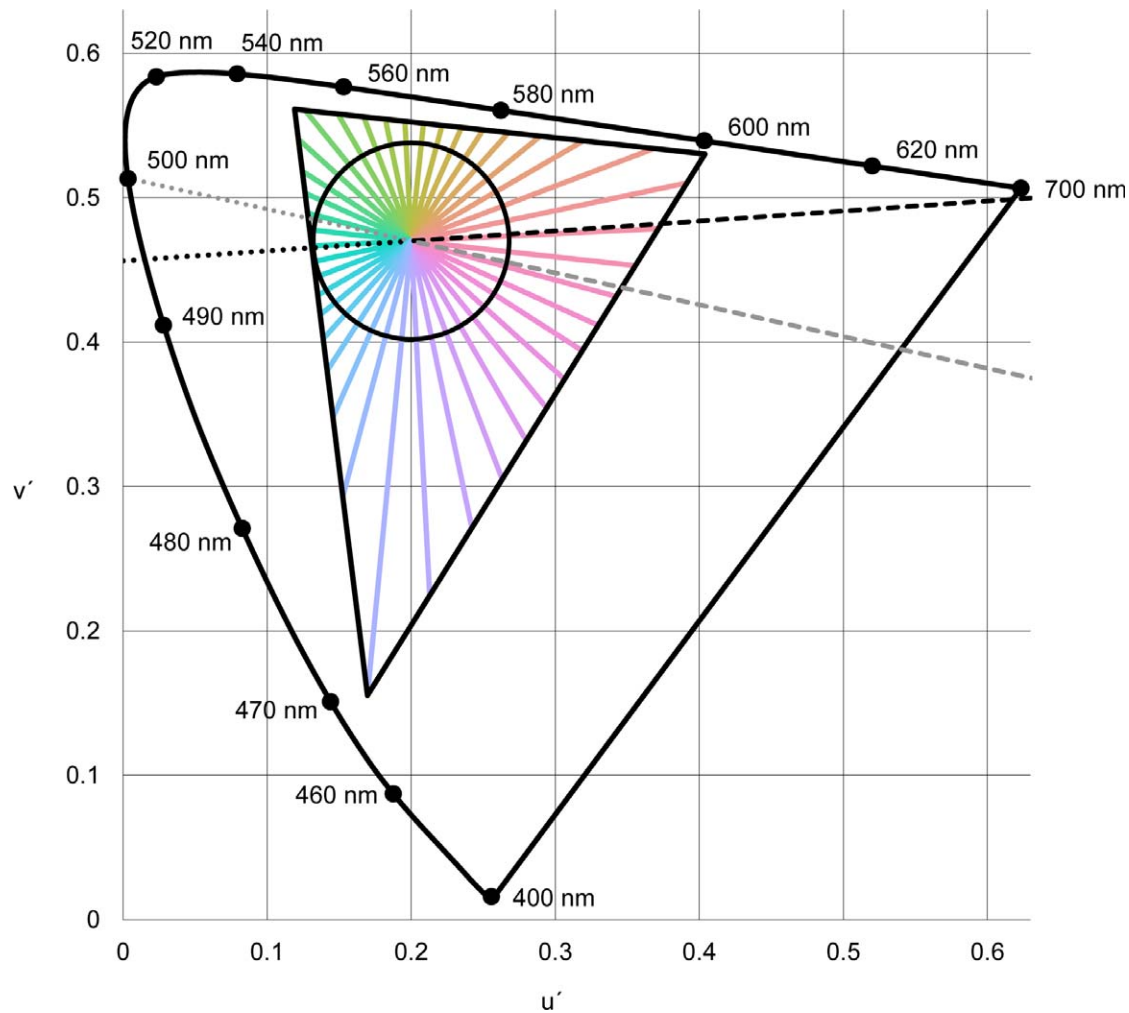


Figure 1. Representation of the chromatic coordinates for the stimuli included in the two stimulus sets used in the Pseudoachromatic Stimuli Identification task. Maximum Chroma set: intersections between radii (40 different chromatic angles) and triangle perimeter; Constant Chroma set: intersections between radii and circle. The center of the circle corresponds to the achromatic point. The triangle vertices to the three screen primaries. Two confusion lines cross the achromatic point. Black line is for protanopes; gray line is for deuteranopes. Dotted segments are for pseudoachromatic greens; dashed segments are for pseudoachromatic reds.

The real dichromats' behavior in the two psychophysical tasks performed (see next paragraph) are analyzed. Later, the real dichromats' data are compared with the behaviors predicted by the algorithm and with those of simulated dichromats in order to check the algorithm's validity and the tool's accuracy in simulating color vision. Finally, we compare the behaviors predicted by the algorithm with those provided by simulated dichromats.

Simulcheck includes two psychophysical tasks named Pseudoachromatic Stimuli Identification and Minimum Achromatic Contrast. Each task is related to a well-known fact of dichromatic color vision and with the performance of an opponent mechanism (the yellow–blue mechanism or the achromatic mechanism). *Pseudoachromatic Stimuli Identification task.* Color derives from the activity of red–green, yellow–blue, and achromatic mechanisms. It is commonly assumed that protanopes and deuteranopes have no functionality in

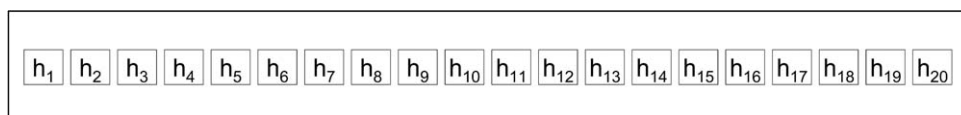


Figure 2. Schematic version of the spatial configuration used in the Pseudoachromatic Stimuli Identification task. Twenty stimuli (a semiset) were simultaneously presented. Their chromatic angles (h_{uv}) changed from left to right.



Figure 3. Minimum Achromatic Contrast task stimuli configuration. Selected colors in the Pseudoachromatic Stimuli Identification task appeared in text in the Minimum Achromatic Contrast task. Achromatic backgrounds changed from white (up and left) to black (down and rightmost) by steps of five L^* units.

the red–green mechanism and, consequently, see no differences between the grays and the stimuli producing a neutral response in their yellow–blue mechanism. Several works (Birch, 2001; Fletcher & Voke, 1985; Smith & Pokorny, 2003) have shown that each dichromat type has two dominant wavelengths (λ_d) and, consequently, two chromatic angles (h_{uv}) that identify pseudoachromatic angles. One (Smith & Pokorny, 2003) is located near $\lambda_d = 494$ nm ($h_{uv} = 183.95^\circ$) for protanopes and $\lambda_d = 499$ nm ($h_{uv} = 167.39^\circ$) for

deuteranopes.² We name stimuli with such λ_d - h_{uv} values “pseudoachromatic greens” because they are categorized as greens (more specifically, bluish greens) by normal people. The other dominant wavelength associated with pseudoachromatic color (Smith & Pokorny, 2003) is located near $\lambda_d = -494$ nm ($h_{uv} = 3.95^\circ$) for protanopes and $\lambda_d = -499$ nm ($h_{uv} = 347.39^\circ$) for deuteranopes.³ We name stimuli with such λ_d - h_{uv} values “pseudoachromatic reds” because they are categorized as reds (or reddish purples) by normal people.

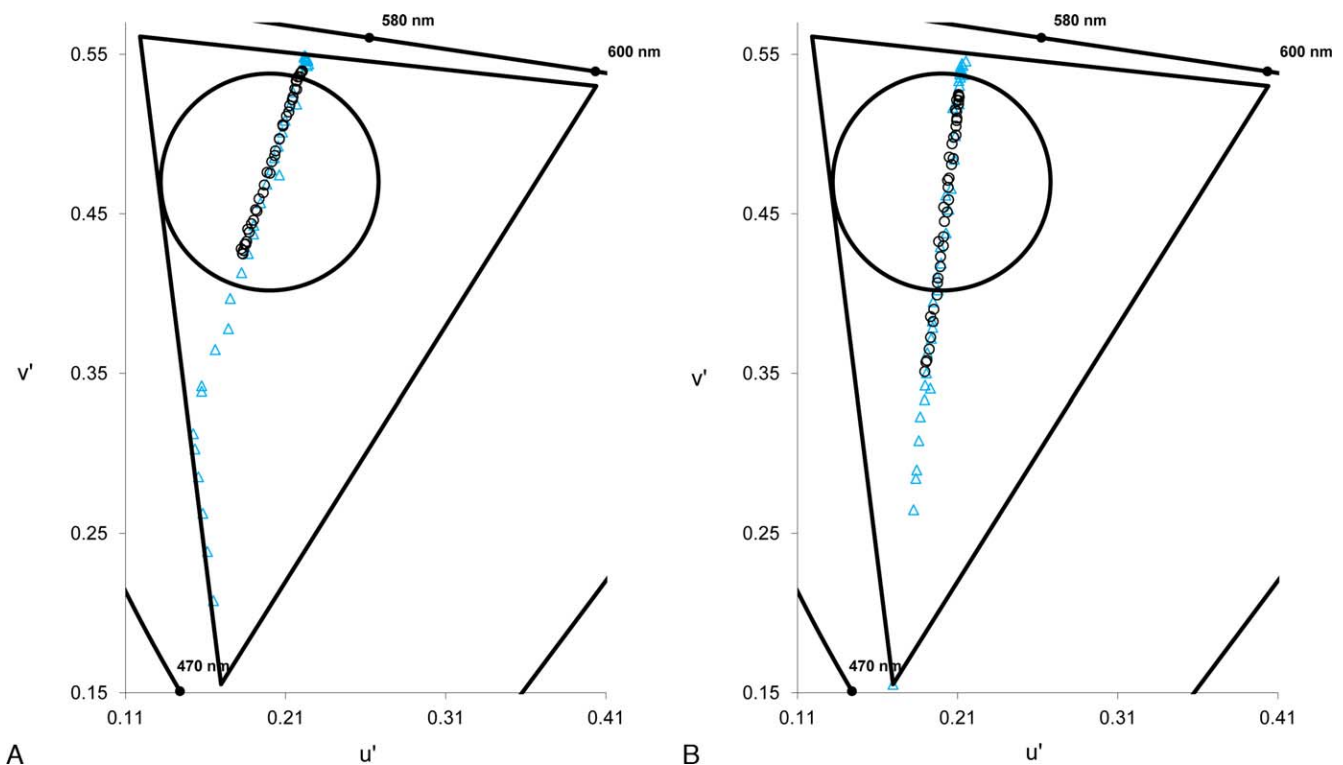


Figure 4. Chromatic coordinates provided by the protanope transformations for Vischeck (A) and Coblis (B). Solid lines include the chromatic coordinates of both original stimulus sets (triangle = Maximum Chroma; circle = Constant Chroma). Small symbols (triangles = Maximum Chroma; circles = Constant Chroma) show the chromatic coordinates after being transformed.

The chromatic angles (h_{uv}) corresponding to the pseudoachromatic greens and reds are the first type of variable provided by Simulcheck to evaluate simulation tools' accuracy. They allow specifying the stimuli that produce a minimum response in the yellow–blue mechanism of real and simulated dichromats.

Minimum Achromatic Contrast. Only the achromatic mechanism responds to the highest visible spatial frequencies (De Valois & De Valois, 1988, chapter 7; Kaiser & Boynton, 1996, chapter 9). It makes it possible to see small details and provides maximum visual acuity. The achromatic mechanism performance depends essentially on the response of L and M cones (Hunt & Pointer, 2011, chapter 1). For people with trichromatic color vision, its spectral sensitivity is very similar to the spectral luminous efficiency function for photopic vision (Hunt & Pointer, 2011, pp. 21–22), $V(\lambda)$, and, consequently, to the weighting performed by the standard photometric measurement apparatuses (Kaiser & Boynton, 1996, appendixes 1 and 2). The achromatic mechanism spectral sensitivity is anomalous for people lacking L (protanopes) or M (deuteranopes) cones (Birch, 2001, figure 4.2). Such anomaly is bigger for the protanopes because L cones are more frequent and contribute more to the achromatic mechanism response (Carroll et al., 2002; Hunt & Pointer, 2011, chapter 1).

Previously, we (Lillo, Collado, Martín, & García, 1999; Lillo & Moreira, 2005) developed the AMLA (AM = achromatic measurement, LA = luminosity adjustment) method to compute the transformed luminance (L_T) variable in people who are color blind.⁴ AMLA includes tasks similar to some others classically used for defining $V(\lambda)$. The Minimum Achromatic Contrast task is the second Simulcheck task. It serves to determine the luminance that an achromatic background must have to make most difficult the reading of a colored text. It is assumed that the L_T value for such color is equal to the standard luminance (L) of the selected background. In the Simulcheck method, the Minimum Achromatic Contrast task is used to measure the L_T value for the pseudoachromatic greens and reds previously selected in the Pseudoachromatic Stimuli Identification task.

Comparing L_T with L provides relative luminance ($L_R = L_T/L$).⁵ L_R is the second variable used by Simulcheck to evaluate simulation tools' accuracy—specifically, how much the responses of the achromatic mechanism differ between dichromats and normals. L_R values provide a very intuitive specification of such differences. Values over one correspond to stimuli that are perceived to be lighter by people who are color blind (real or simulated) than by normal people. The reverse is true when L_R is less than one.

We also evaluated Simulcheck's consistency using two different stimulus sets in the Pseudoachromatic Stimuli Identification task. Although such sets had important colorimetric differences, we expected this fact did not substantially influence the pattern of results obtained for the h_{uv} and L_R values provided by Simulcheck.

Simulcheck was applied to real dichromats and to simulated dichromats using three color simulation tools. One of the tools was the Variantor goggles. Variantor goggles perform an optical transformation that works for any kind of visual stimulation and hence it is not restricted to screen colors. Variantor's main limitation is that it does not provide different transformations for different types of dichromatism. The other two tools were free access tools: Vischeck (<http://www.vischeck.com/vischeck/>) and Coblis (<http://www.color-blindness.com/coblis-color-blindness-simulator/>). Both Vischeck and Coblis use software for transforming screen colors into other colors that are supposedly similar to the ones seen by protanopes or deuteranopes. For Vischeck the transformation is based in the algorithm developed by Brettel et al. (1997; see Footnote 1). There is no comparable information for Coblis and Variantor. We provide information about chromatic coordinates in order to specify the results produced by these software simulation tools. We used two stimulus sets (Maximum Chroma and Constant Chroma) for evaluating Simulcheck's consistency.

Methods

Participants

A total of 10 normal trichromats (four men, six women; age range 22–30 years) and 10 dichromats (five protanopes, five deuteranopes; nine men, one woman; age range 21–34 years) took part in the experiment. Their color vision was tested with a set of psychophysical tests (Fletcher, 1980 [City University Color Vision Test]; Ishihara, 1996; Lanthony, 1985). In order to assign them to groups, participants with color vision deficiencies also performed a Rayleigh match in a Nagel anomaloscope (Tomey AF-1, Tomey, Nagoya, Japan). All participants collaborated voluntarily in the research and could stop their participation at any moment.

Materials and stimuli

Stimuli were presented using a Sony Trinitron Multiscan 17 SEII screen (Sony, Tokyo, Japan) with a gamma correction equal to 2.15. Primaries luminance

(Y) and chromatic coordinates (u' , v') were as follows: red ($Y = 14.6$; $u' = 0.404$, $v' = 0.530$), green ($Y = 31.2$; $u' = 0.119$, $v' = 0.561$), and blue ($Y = 3.5$; $u' = 0.170$, $v' = 0.155$). Equivalent values for the screen white were $Y = 49.3$; $u' = 0.204$, $v' = 0.467$. During part of the experiment normal trichromats used Variantor glasses (<http://www.variantor.co.uk/page.php?sub=2&id=2>; Cambridge Research Systems, Kent, UK). The measurements of primaries through the goggles provided the following results: red ($Y = 0.95$; $u' = 0.268$, $v' = 0.524$), green ($Y = 6.65$; $u' = 0.205$, $v' = 0.546$), and blue ($Y = 0.35$; $u' = 0.185$, $v' = 0.161$). Equivalent values for the screen white were $Y = 7.95$; $u' = 0.211$, $v' = 0.447$. All the measurements were performed using a Minolta CL-200 luxcolorimeter (Minolta, Tokyo, Japan) with the required accessories. The room where the screen was located had an illuminance level near 3 lux in the area near the screen.

Figure 1 gives the colorimetric characteristics of the stimuli included in the two stimulus sets of the Pseudoachromatic Stimuli Identification task. The 40 radii departing from the coordinates of white ($u' = 0.204$, $v' = 0.467$) correspond to chromatic angles (h_{uv}) changing in 9° steps (3° , 12° , 21° , ..., 354°). Coordinates of stimulus sets were defined by the intersection of the radii and the triangle defined by the three screen primaries (Maximum Chroma set) or the radii and the circle (Constant Chroma set). The circle radius was defined by the less-saturated angle available in the monitor color gamut ($h_{uv} = 183^\circ$, saturation, $s_{uv} = 0.884$). The stimuli included in this last set had similar C^*_{uv} (chroma) and L^* (lightness) values ($C^*_{uv} = 66.5$, maximum value possible in all the chromatic angles; $L^* = 75$). For the Maximum Chroma set, C^*_{uv} and L^* changed for the different chromatic angles (C^*_{uv} was the maximum possible in each angle, and L^* was the value that made possible such maximum C^*_{uv}).

Procedure

Participants performed 20 trials (10 for each stimulus set; five for pseudoachromatic green and five for red). Each trial included a Pseudoachromatic Stimuli Identification task (task 1) and, after it, a Minimum Achromatic Contrast task (task 2). Real dichromats performed the Pseudoachromatic Stimuli Identification task responding to the original stimuli included in both sets (Maximum Chroma and Constant Chroma; Figure 1), but normal trichromats responded, in different moments, to the stimuli transformed by each simulation tool (Variantor, Coblis, and Vischeck). One half of the normal observers performed all the trials with the optical tool (Variantor) before beginning with the software tools (Coblis and Vischeck; their trials were randomized); the other half did so in the opposite

order. Figure 2 provides a schematic version of the spatial configuration used in the Pseudoachromatic Stimuli Identification task. A total of 20 stimuli (half set, a semiset) were simultaneously presented. They belonged to one of the two stimulus sets (Maximum Chroma or Constant Chroma). Chromatic angle (h_{uv}) value was increased from left to right by 9° steps (h_1 , h_2 , h_3 , ..., h_{20}). Each stimulus was a 1.3-cm-wide square that projected 1.5° by 1.5° when viewed from 50 cm. In half of the trials the leftmost stimulus h_{uv} was $84^\circ \pm 18^\circ$ (pseudoachromatic green selection). In the other half it was $264^\circ \pm 18^\circ$ (pseudoachromatic red selection). The $\pm 18^\circ$ random variation was used to avoid the presentation of the stimuli in exactly the same position across trials. The order of the pseudoachromatics (green and red) and the sets (Maximum Chroma and Constant Chroma) was randomized. In each of the 20 trials of the Pseudoachromatic Stimuli Identification task, participants were required to select the stimulus most similar to gray. If participants indicated that a hint of hue was still present, they were required to select the less-saturated stimulus.

Colors selected in the Pseudoachromatic Stimuli Identification task were used in the Minimum Achromatic Contrast task. They appeared in text (the word “ENSAYO” written two times) presented on 20 achromatic backgrounds (Figure 3). Each background measured $5.6 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ ($6.4^\circ \times 1.2^\circ$). The full horizontal length for the semiset was 27.2 cm. The vertical length was 10 cm. The lightest background ($L^* = 100$) was located at the upper left and the darkest background ($L^* = 2.04$) was located in the lower right. L^* changed in five L^* steps between the more similar backgrounds. Both tasks' stimuli configurations were presented on a gray background ($L^* = 90$). In the Minimum Achromatic Contrast task, participants were required to select the background that made it most difficult to read the text.

Results

Colorimetric transformation and the implementation accuracy of the algorithm

In Figures 4 through 6, the blue and black symbols correspond to the Maximum Chroma and Constant Chroma stimulus sets, respectively. The solid lines correspond to the triangle and the circle used to define the Maximum Chroma and Constant Chroma sets without transformation. Figure 4 is for protanope simulations and Figure 5 is for deutanope simulations. Figure 6 provides equivalent information for Variantor (no different transformation for protanopes and deutanopes).

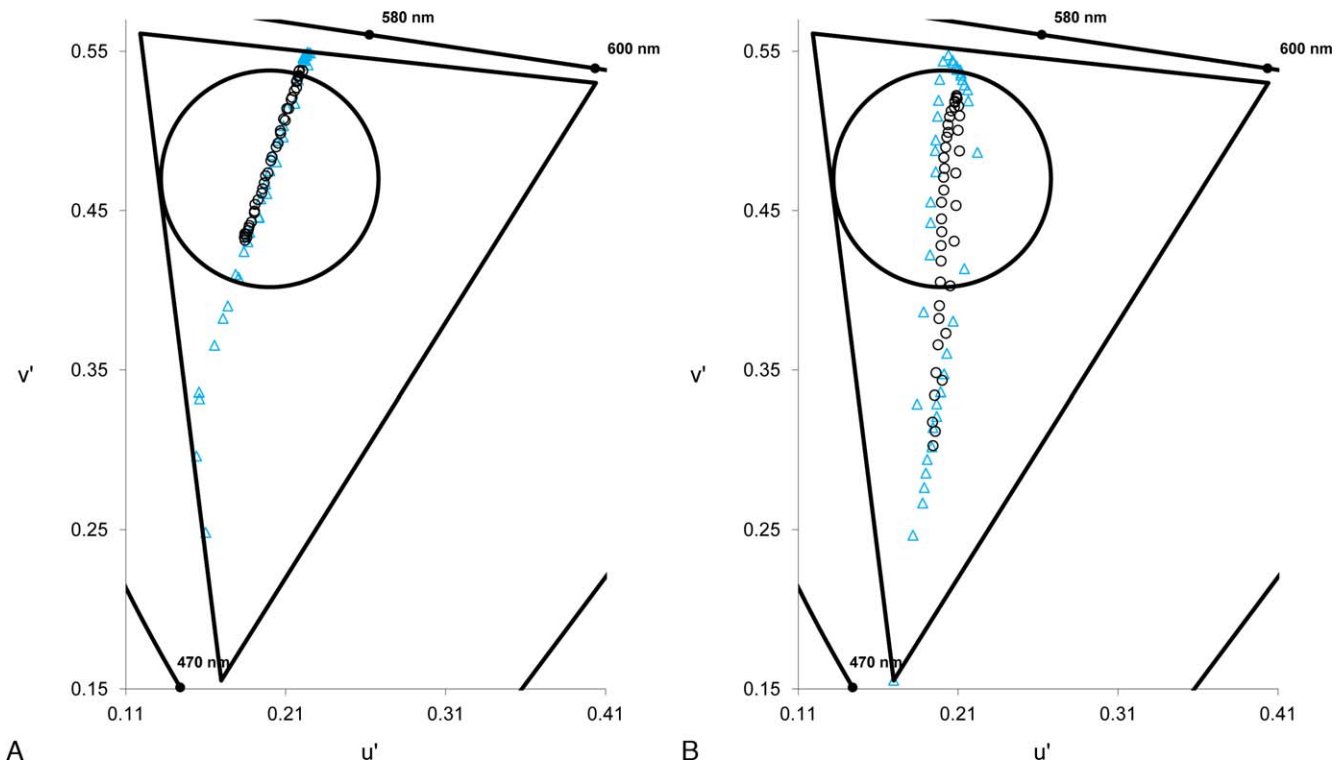


Figure 5. Chromatic coordinates provided by the deuteranope transformations for Vischeck (A) and Coblis (B). Solid lines include the chromatic coordinates of both original stimulus sets (triangle = Maximum Chroma; circle = Constant Chroma). Small symbols (triangles = Maximum Chroma; circles = Constant Chroma) show the chromatic coordinates after being transformed.

In order to test the accuracy of Vischeck in the implementation of Brettel et al.'s (1997) algorithm, a series of linear regression analyses of the chromatic coordinates of the transformed stimuli were performed. Table 1 provides the main results related to these analyses. The three leftmost columns specify the simulation tool, the stimulus set, and the location of transformed stimuli (over [Y, yellow] or below [B, blue] the achromatic point). The three next columns indicate the R^2 values (proportion of variance explained by the model), F -test statistic values, and degrees of freedom for each linear regression analysis. The rightmost columns indicate the dominant wavelengths matched by the best-fitting lines and the corresponding h_{uv} values.

The Vischeck simulations for the Constant Chroma set were very close to straight lines (protanopia minimum $R^2 = 0.980$; deuteranopia minimum $R^2 = 0.982$). Best-fitting lines matched dominant wavelengths $\lambda_d \approx 575$ and 476 nm (yellow and blue, respectively; the same for protanopia and deuteranopia), which are almost identical to the ones that Brettel et al.'s (1997) algorithm assumes to be equally perceived by dichromats and normal trichromats ($\lambda_d = 575$ and 475 nm, respectively; $h_{uv} = 71.86^\circ$ and 252.19° , respectively). The Vischeck lines corresponding to the Maximum Chroma set matched the following dominant wavelengths: protanopia $\lambda_d \approx 575$ and 473 nm;

deuteranopia $\lambda_d \approx 575$ and 474 nm. The yellow dominant wavelength was the same irrespective of the stimulus set, but this was not true for the blue dominant wavelength. As can be observed in Figures 4A and 5A, monitor color gamut did not make it possible for the Maximum Chroma set to align along a unique straight line in both Vischeck simulations. Instead, two segments can be appreciated. The first segment radiates from the achromatic point to the triangle and matched dominant wavelength $\lambda_d \approx 475$ nm (protanopia $R^2 = 0.988$, $F(1, 9) = 771.164$, $p < 0.001$; deuteranopia $R^2 = 0.994$, $F(1, 13) = 2065.141$, $p < 0.001$). The second segment overlaps the line of the triangle defined by the green and blue primaries.

Only for comparison purposes, the same analyses were performed using the chromatic coordinates of the stimuli transformed by Coblis (we omit Variantor because its stimuli are close to an ellipse or a triangle but not to a straight line; Figure 6). Coblis' simulation for protanopes was closer to a straight line (Figure 4B; minimum $R^2 = 0.726$) than its simulation for deuteranopes (Figure 5B; deuteranopia maximum $R^2 = 0.393$). Coblis' protanopia simulation lines matched the same dominant wavelengths irrespective of the stimulus set (Maximum Chroma set $\lambda_d \approx 571$ and 466 nm; Constant Chroma set $\lambda_d \approx 571$ and 467 nm). Coblis' deuteranopia simulation was not close to a straight line, but we show its results for contrast purposes. Such

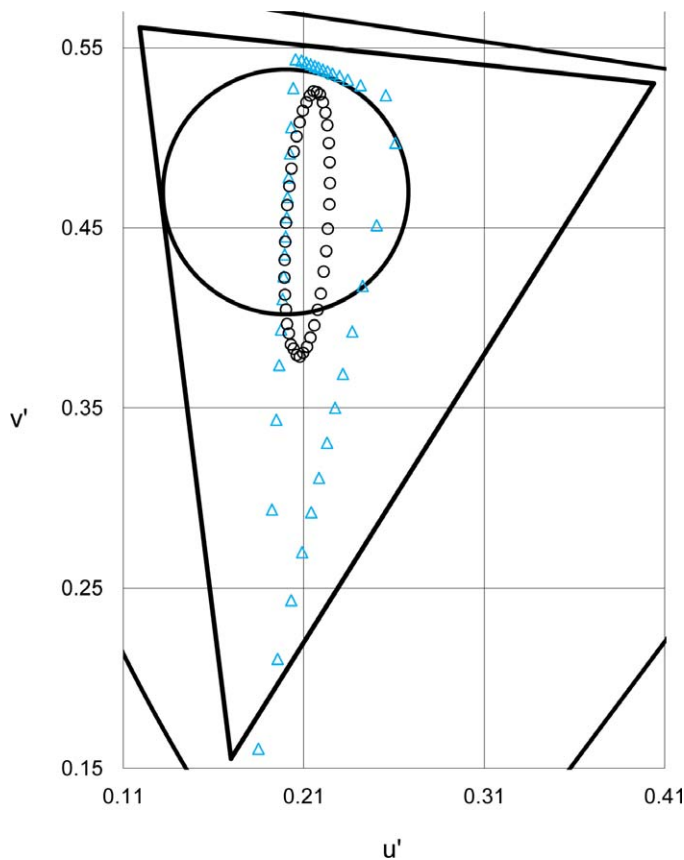


Figure 6. Chromatic coordinates provided by the Variantor transformation. Solid lines include the chromatic coordinates of both original stimulus sets (triangle = Maximum Chroma; circle = Constant Chroma). Small symbols (triangles = Maximum Chroma; circles = Constant Chroma) show the chromatic coordinates after Variantor transformation.

simulation matched the following dominant wavelength: Maximum Chroma set $\lambda_d \approx 575$ and 470 nm; Constant Chroma set $\lambda_d \approx 577$ and 469 nm.

Real dichromats' behavior

Results provided by real dichromats are now commented on. Next, we compared these results with (1) the predictions made by Brettel et al.'s (1997) algorithm and (2) the simulated dichromats.

Figures 7 (Pseudoachromatic Stimuli Identification) and 8 (Minimum Achromatic Contrast) show mean h_{uv} and L_R values both for real protanopes (left) and real deuteranopes (right). Each group of four bars shows the results for the two stimulus sets (Maximum Chroma and Constant Chroma) and the two pseudoachromatic selections (green and red). Bar colors and saturation are consistent with the type of pseudoachromatic selected (green and red) and the set (Maximum Chroma and Constant Chroma).

As can be observed in Figures 7 and 8, even though h_{uv} and L_R values showed some differences depending on stimulus set, such differences were of reduced magnitude (h_{uv}) and did not appear on a qualitative level (h_{uv} and L_R).⁶ Specifically, protanope h_{uv} values were near 180° for the green pseudoachromatic and near 360° for the red pseudoachromatic (Figure 7, left), and deuteranope h_{uv} values always represented a clockwise change (fewer degrees) in relation to protanopes (Figure 7, left bars higher). Protanope L_R values were always lower for pseudoachromatic reds but the opposite was true for the pseudoachromatic greens

Simulation tool	Stimulus set		R^2	F	df	λ_d	h_{uv} ($^\circ$)
Vischeck P	CC	Y	0.993***	3313.47	1, 22	574.53	70.81
		B	0.980***	693.607	1, 14	475.54	251.98
	MC	Y	0.948***	379.042	1, 21	574.57	70.65
		B	0.716***	37.871	1, 15	472.56	257.04
Vischeck D	CC	Y	0.993***	2980.21	1, 22	574.61	70.51
		B	0.982***	766.97	1, 14	476.02	251.03
	MC	Y	0.973***	746.151	1, 21	574.58	70.60
		B	0.865***	96.336	1, 15	473.61	255.42
Coblis P	CC	Y	0.852***	120.51	1, 21	571.26	83.80
		B	0.928***	194.325	1, 15	466.78	263.21
	MC	Y	0.726***	47.757	1, 18	571.21	83.98
		B	0.968***	541.563	1, 18	466.12	264.54
Coblis D	CC	Y	0.127	3.046	1, 21	574.97	69.09
		B	0.117	1.995	1, 15	469.50	261.00
	MC	Y	0.095	1.999	1, 19	577.11	60.78
		B	0.393**	10.985	1, 17	469.16	261.38

Table 1. Linear regression analyses values (R^2 , F , and df), dominant wavelengths (λ_d), and chromatic angles (h_{uv}) matched by each simulation tool. Dichromat type: P = protanope, D = deuteranope. Stimulus set: MC = Maximum Chroma, CC = Constant Chroma; Y = yellow, B = blue. ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

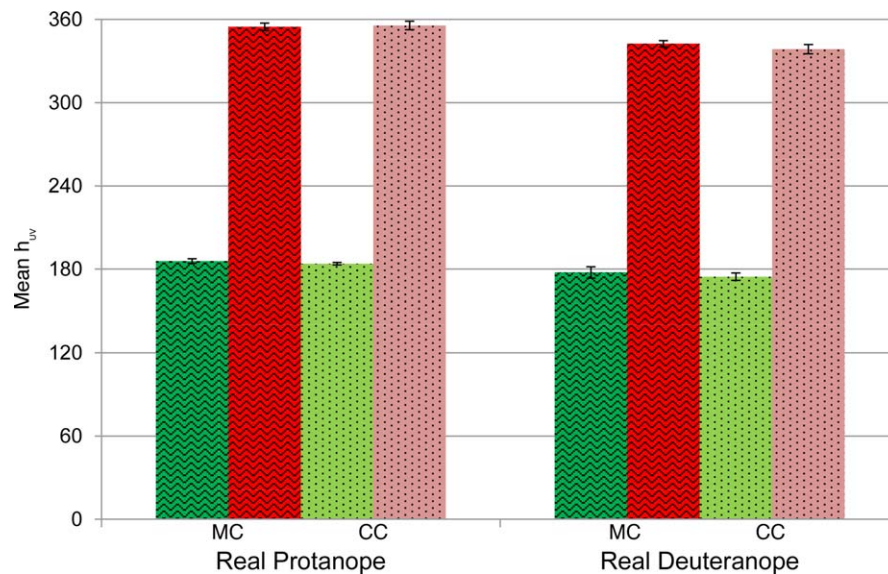


Figure 7. Mean h_{uv} selected by real protanopes (left) and deuteranopes (right). Each group of four bars represents the results for the two stimulus sets (MC = Maximum Chroma; CC = Constant Chroma) for the two pseudoachromatic selections (green and red). Its colors are consistent with the set and type of pseudoachromatic selected. Error bars show standard error of the mean (SEM).

(Figure 8, left); deuteranopes showed the reverse pattern (Figure 8, right).

Several statistical analyses were performed to study the above patterns. There were no significant differences (Wilcoxon signed-rank test, null hypothesis: h_{uv} Maximum Chroma = h_{uv} Constant Chroma, $p > 0.05$) in h_{uv} values of real dichromats depending on the stimulus set (exception made for red in deuteranopes, $p = 0.043$). On the other hand, there were significant differences (Mann-Whitney U test, null hypothesis: h_{uv} or L_R real protanope = h_{uv} or L_R real deuteranope, $p < 0.05$) in seven of the eight possible comparisons (two types of pseudoachromatics [red and green] \times two stimulus sets \times two variables [h_{uv} and L_R]). The results can be summarized as follows. All deuteranope h_{uv} values were different in the clockwise direction in relation to protanope h_{uv} values ($p < 0.05$). Only for the

green Maximum Chroma condition the difference was not significant ($z = -1.362$, $p = 0.111$, $N = 10$). Protanope L_R values were significantly greater than the deuteranope L_R values for the green pseudoachromatics ($p < 0.05$), but the opposite was true for the red pseudoachromatics ($p < 0.05$).

Brettel et al.'s (1997) algorithm versus real dichromats: Algorithm validity

From the rationale of the algorithm of Brettel et al. (1997), we derived the following predictions related to the performance of real and simulated dichromats in the experimental tasks.

Pseudoachromatic Stimuli Identification task. The h_{uv} predicted values were obtained from the pseudoachro-

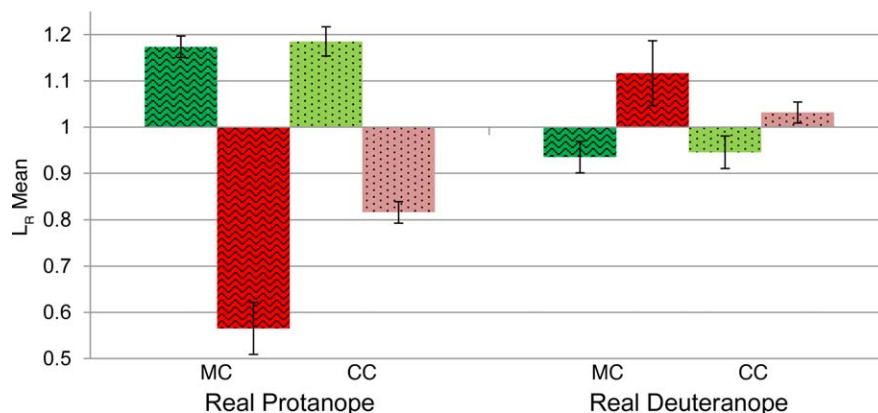


Figure 8. Mean L_R selected by real protanopes (left) and deuteranopes (right). See Figure 7 caption for a detailed description.

Dependent variable	Maximum Chroma		Constant Chroma	
	Protanope	Deutanope	Protanope	Deutanope
h_{uv} green	179.41°–188.62° (182.86°)	165.41°–188.03° (169.31°)	181.41°–186.35° (183°)	167.17°–182.05° (169.5°)
h_{uv} red	349.62°–364.67° (2.86°)	334.63°–347.72° (344.89°)	349.15°–366.18° (3°)	332.9°–351.3° (349.5°)
L_R green	1.11–1.27 (1.13)	0.83–1.02 (0.93)	1.11–1.28 (1.14)	0.85–1.04 (0.92)
L_R red	0.42–0.73 (0.73)	0.90–1.29 (1.13)	0.75–0.88 (0.94)**	0.97–1.10 (1.03)

Table 2. The h_{uv} and L_R values of pseudoachromatic stimuli: 95% CIs for the mean of selected stimuli by real dichromats (outside brackets) and predicted values (between brackets) for each set (Maximum Chroma and Constant Chroma). ** $p < 0.01$.

matic confusion line (Smith & Pokorny, 2003) using the white of the monitor as the reference white (the predicted h_{uv} was the one corresponding to the nearest stimulus). Strictly speaking, the algorithm assumes that the equienergetic stimulus produces the same perception in dichromats as in normal trichromats (see Footnote 1). Nevertheless, we slightly modified the predictions because our reference white did not match the equienergetic stimulus.

Minimum Achromatic Contrast. Because protanopes and deutanopes lack L and M cones, respectively, and because it is commonly assumed that S cones barely contribute to luminance (Hunt & Pointer, 2011, chapter 1), the background selected in this task should be the one that produces the response that is most similar to the one produced by the colored text in M (protanopes) or L (deutanopes) cones. We specify this prediction using the L_R variable ($L_R = L_T/L$) because, as explained before, it gives very intuitive values. Two L_R values were computed for each stimulus, taking into account protanopes' lack of L cones and deutanopes' lack of M cones. The procedure was as follows. First, we estimated L and M cone responses for each stimulus using Stockman and Sharpe (2000; see also Stockman, MacLeod, & Johnson, 1993) $L_2(\lambda)$ and $M_2(\lambda)$ cone spectral sensitivities (these are the fundamentals used by the algorithm of Brettel et al., 1997) and stimulus spectra. The relative contribution of L and M cones to luminosity was derived from $V_2^*(\lambda) = 1.5L_2(\lambda) + M_2(\lambda)$ (Stockman & Sharpe, 2000, equation 7). These estimations were used to compute a specific transformed luminance for protanopes and deutanopes on the assumption that the luminance of the reference white is exactly the same for normal trichromats and dichromats, which makes it possible to compute a scaling factor for protanopes and another for deutanopes. Finally, we computed the corresponding relative luminance values (L_R) for both types of dichromats (for an analogous procedure applied to surface stimuli, see Moreira, Lillo, Álvaro, & Davies, 2014).

We computed confidence intervals (CI) for the mean of the selected stimuli in task 1 (h_{uv}) and task 2 (L_R) in order to check if the predicted values fell within that range. Table 2 provides the main results related to these

analyses. The leftmost column specifies the dependent variable (h_{uv} or L_R) and the type of pseudoachromatic selection (green or red). The next two columns show data corresponding to the Maximum Chroma set. The rightmost two columns show data corresponding to the Constant Chroma set. For each set, two types of information are provided: CIs (outside brackets) for the two types of real dichromats considered (protanope, left; deutanope, right) and predictions derived from the rationale of Brettel et al.'s (1997) algorithm (between brackets).

Even though h_{uv} and L_R predicted values were different depending on the stimulus set, such differences did not appear on a qualitative level. Specifically, (1) h_{uv} predicted values for deutanopes always represented a clockwise change in relation to protanopes, and (2) L_R predicted values were always lower for protanopes for pseudoachromatic reds whereas the opposite was true for pseudoachromatic greens.⁶

No comparison (out of 16) of real dichromats' empirical values and predicted values was significant (one-sample t -test, null hypothesis: the predicted value fell within the empirical 95% CI) except for L_R red Constant Chroma in protanopes, 95% CI [0.75, 0.88], predicted $L_R = 0.94$, $p < 0.01$.

Real versus simulated dichromats: Tool accuracy

Figures 9 and 10 show mean differences between simulated and real dichromats ($D = \bar{S} - \bar{R}$). In order to facilitate comparisons, leftmost bars are for Vischeck, middle bars are for Variantor, and rightmost bars are for Coblis. Each group of four bars shows the results for a tool with the two stimulus sets (Maximum Chroma and Constant Chroma) and the two pseudoachromatic selections (green and red). Bar colors are consistent with the type of pseudoachromatic selected. In Figures 9 and 10, the upper parts (Figures 9A and 10A) are for protanopes and the lower parts (Figures 9B and 10B) are for deutanopes. In Figures 9 and 10, the asterisks indicate the results of a series of Mann-Whitney U tests (null hypothesis: h_{uv} or L_R real dichromat = h_{uv} or L_R simulated dichromat; * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$).

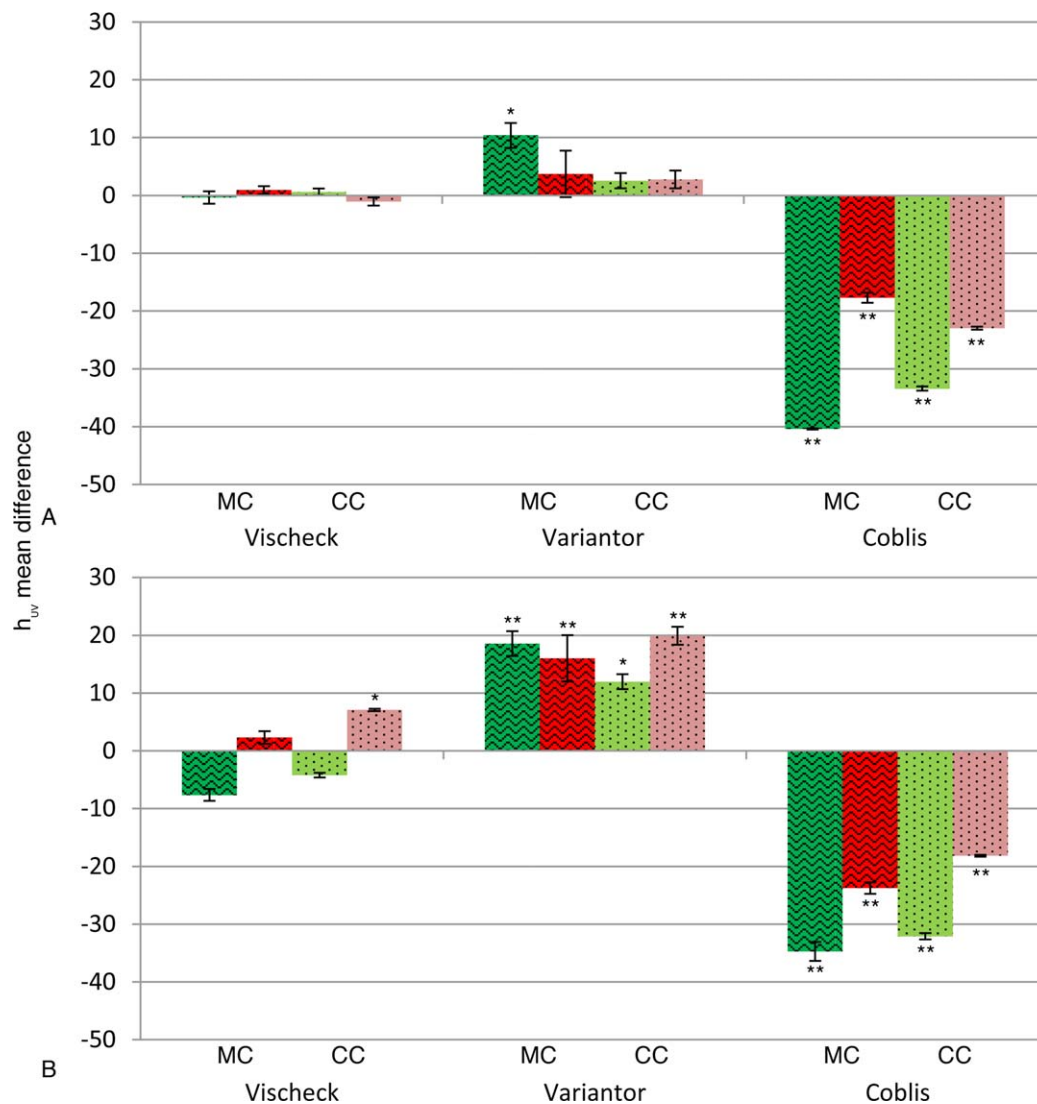


Figure 9. Mean differences in h_{uv} values between simulated and real dichromats (tool accuracy evaluation) for protanopes (A) and deuteranopes (B). Each group of four bars represents the results of the simulated dichromats for the two stimulus sets (MC = Maximum Chroma; CC = Constant Chroma) for the two pseudoachromatic selections (green and red). Its colors are consistent with the set and type of pseudoachromatic selected. Error bars show standard error of the mean (SEM). * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$.

As for real dichromats, although h_{uv} and L_R values showed some differences in each simulation tool depending on stimulus set, such differences did not appear on a qualitative level (see Footnote 6), so it is possible to summarize our results as follows. First, there were not big differences between Vischeck-simulated dichromats and real dichromats. Mann-Whitney U tests showed only one significant difference (Figure 9B) for h_{uv} values (deuteranope simulation red Constant Chroma condition). For L_R there were significant differences for both protanope Constant Chroma conditions (Figure 10A), while for deuteranope also appeared significant differences for two of the four possible comparisons (both greens; Figure 10B). Second, conversely, all the differences between Coblis-simulated dichromats and real dichromats were very

big and significant (** $p < 0.01$; Figures 9 and 10). Finally, Variantor produced results halfway between both previous tools. Comparison with real protanopes showed small differences and frequently were not significant (Figures 9A and 10A), whereas for deuteranopes all differences were significant (Figures 9B and 10B) and bigger.

The high similarity for each tool between the two pseudoachromatic greens and reds (Maximum Chroma and Constant Chroma ones) shows that the change of stimulus set produced only minor variations in the results of h_{uv} (Figure 9). Such impression agrees with the results provided by a series of Wilcoxon analyses where no significant differences (null hypothesis: h_{uv} Maximum Chroma = h_{uv} Constant Chroma; $p < 0.05$)

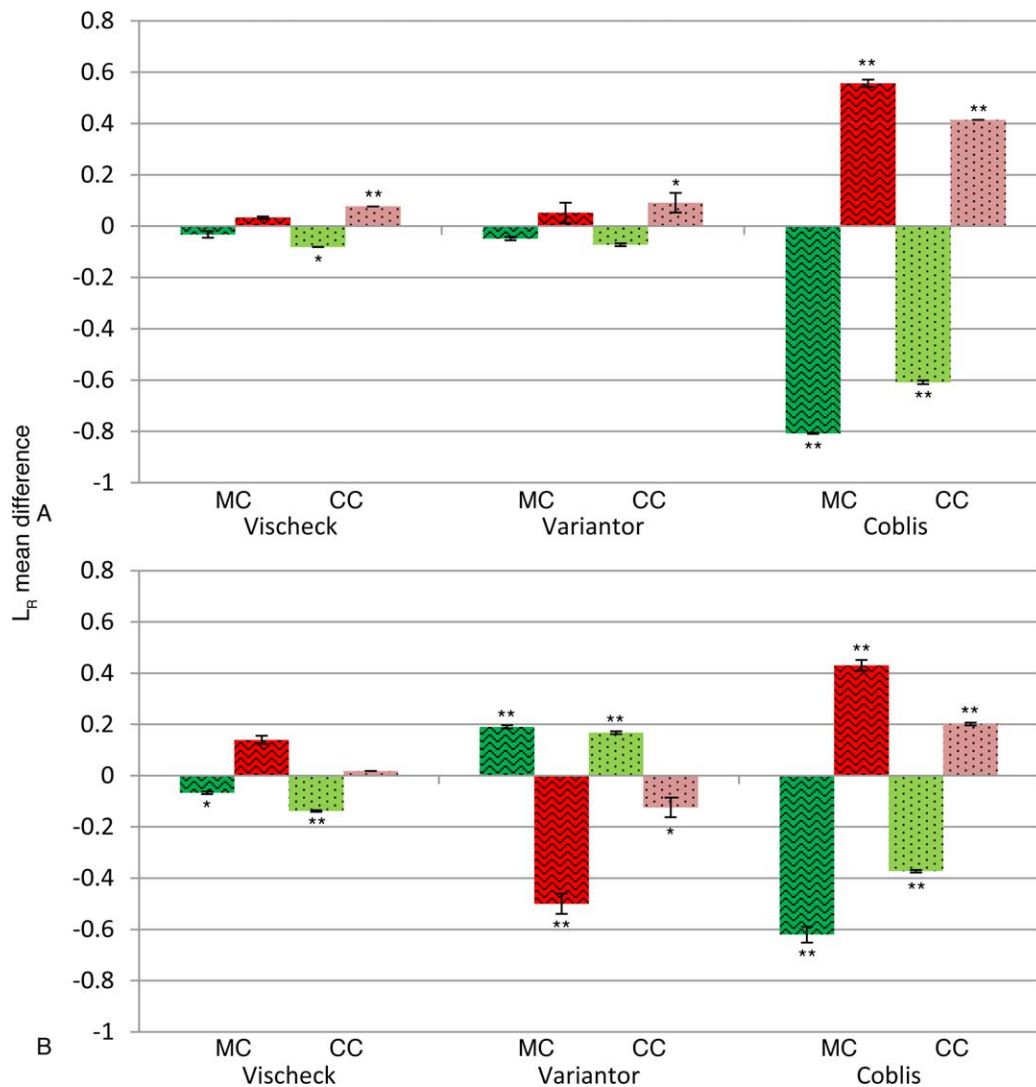


Figure 10. Mean differences in L_R values between simulated and real dichromats (tool accuracy evaluation) for protanopes (A) and deuteranopes (B). See Figure 9 caption for a detailed description.

were found (with the exceptions of Variantor green and Coblis protanopia, both pseudoachromatics).

Brettel et al.'s (1997) algorithm versus simulated dichromats' behavior

As previously done for real dichromats (Table 2), we computed CIs for the mean of the selected stimuli by Vischeck-simulated dichromats (normal trichromats using Vischeck) in task 1 (h_{uv}) and task 2 (L_R) to check if the predicted values derived from Brettel et al.'s (1997) algorithm fell within that range (one-sample t -test, null hypothesis: h_{uv} or L_R predicted = h_{uv} or L_R real or simulated dichromat; * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$). This kind of analysis can be especially useful because it allows potential users of Simulcheck to test if the pattern of results is compatible with a

supposed underlying algorithm, even when no real dichromats are available. Only for comparison purposes, the same analyses were performed for the stimulus selections of normal trichromats using Coblis and Variantor. Figures 11 (Pseudoachromatic Stimuli Identification) and 12 (Minimum Achromatic Contrast) show the differences between the mean of empirical data and predicted values ($D = \bar{S} - \bar{R}$). In order to facilitate comparisons, the first bars are for real dichromats, the second bars are for Vischeck, the third bars are for Variantor, and the fourth bars are for Coblis. Each group of four bars shows the results for a real or simulated dichromat with the two stimulus sets (Maximum Chroma and Constant Chroma) and the two pseudoachromatic selections (green and red). Bar colors are consistent with the type of pseudoachromatic selected. In Figures 11 and 12, the upper parts (Figures 11A and 12A) are for protanopes and the lower parts

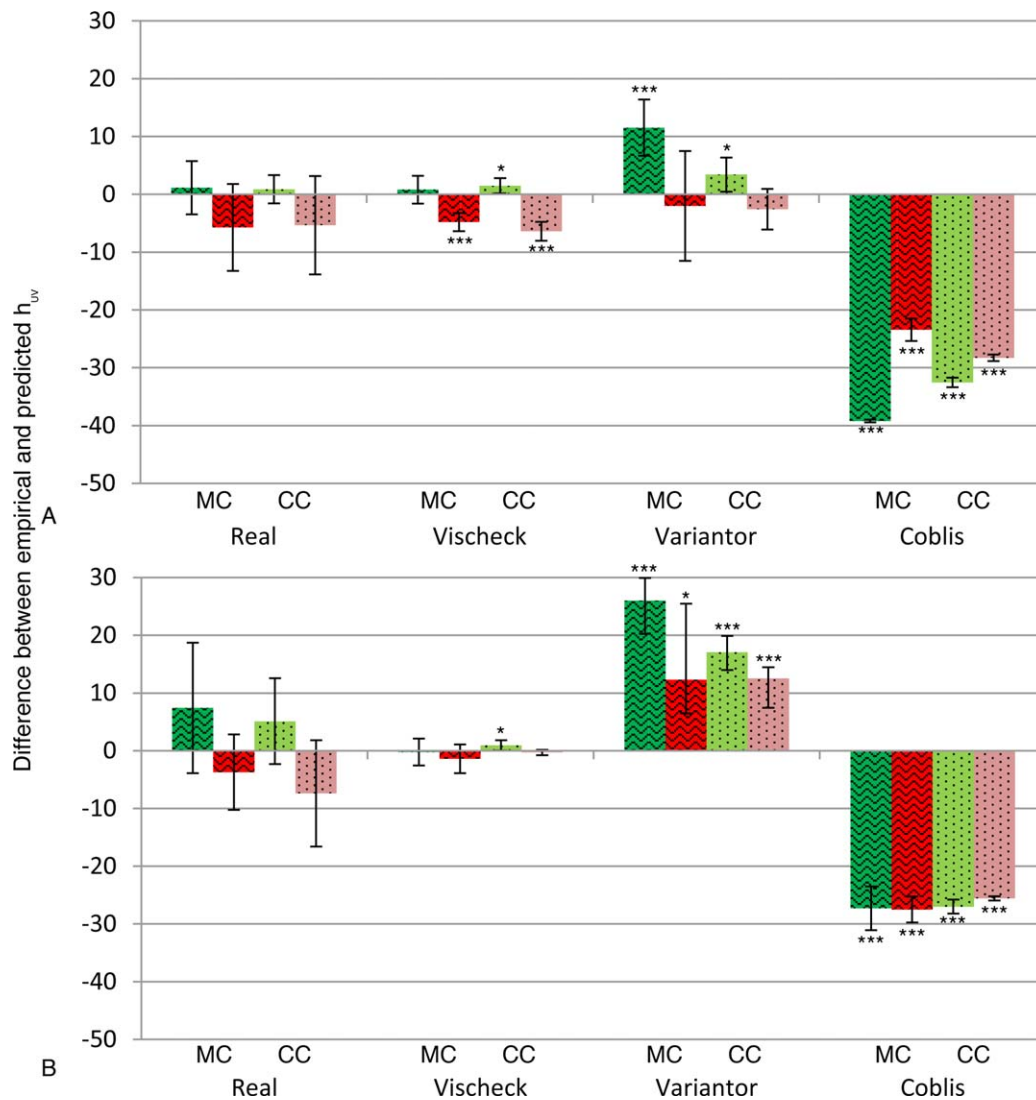


Figure 11. Differences in h_{uv} between the mean of dichromats' data (real or simulated) and predicted values for protanopes (A) and deuteranopes (B). Each group of four bars represents the results of the real or simulated dichromats for the two stimulus sets (MC = Maximum Chroma; CC = Constant Chroma) for the two pseudoachromatic selections (green and red). Its colors are consistent with the set and type of pseudoachromatic selected. Error bars show 95% CIs of real or simulated values. * $p < 0.05$; *** $p < 0.001$.

(Figures 11B and 12B) are for deuteranopes. Error bars represent 95% CIs for the empirical values of real and simulated dichromats, so significant differences arise when zero is not included inside error bars.

Although several comparisons (11 of 16) between Visccheck-simulated dichromats and predictions derived by Brettel et al. (1997) were significant, the magnitude of such differences was minor (Figures 11 and 12). Conversely, the predictions of the algorithm were always out of the CIs for Coblis-simulated dichromats. All the differences were very big and strongly significant (** $p < 0.001$; Figures 11 and 12). On the other hand, Variantor produced results halfway between both previous tools. Variantor simulation CIs better fit Brettel et al.'s (1997) predictions for protan-

opia (four of eight differences were small and significant; Figures 11A and 12A), whereas all the differences were big and significant for deuteranopia (Figures 11B and 12B).

Discussion

New tools aimed at making colors similar to the ones seen by people with color vision deficiencies are becoming increasingly common. A recent paper (Luque et al., 2014) shows that similar transformations are possible even with video streams. Several websites (i.e., <http://play.google.com/store/apps>) provide free appli-

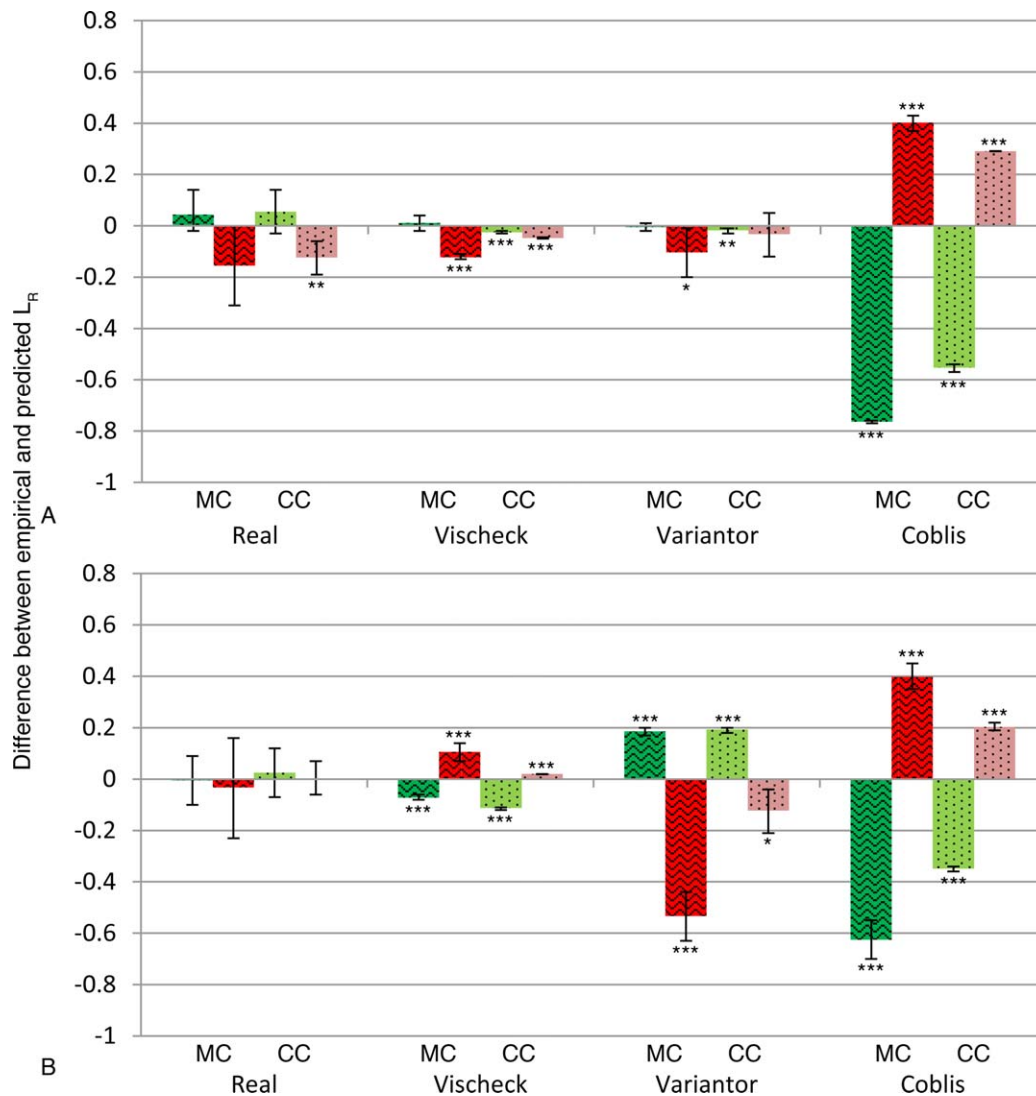


Figure 12. Differences in L_R between the mean of dichromats' data (real or simulated) and predicted values for protanopes (A) and deuteranopes (B). See Figure 11 caption for a detailed description. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

cations ready for working in mobile phones, tablets, and other electronic gadgets. Of course, this availability carries with it the prospect of detecting and eliminating pseudoisochromatic stimuli with the aim of promoting the use of accurate colors for people with and without normal color vision (“universal design”; Vanderheiden, 2006). On the other hand, as the application of the Simulcheck method in this paper has shown, there are good reasons to be cautious about the accuracy of some simulation tools.

Simulcheck is a versatile method that allows the evaluation of simulation tools in different ways. Each one requires comparing two of the following data: (1) predictions derived from the algorithm theoretically used by the tool, (2) the behaviors really provided by responding to the stimuli transformed by the tool (simulated dichromats), and (3) the behaviors of real dichromats. Because in our research the color trans-

formation algorithm was known only for Visccheck, only for this tool was fair the comparison of the algorithm-based predictions and the results provided by real dichromats (algorithm validity; see Table 2 and bars labeled “real” in Figures 11 and 12), or the ones produced when using the tool (bars labeled “Vischeck” in Figures 11 and 12). Obviously, for the three evaluated tools (Vischeck, Variantor, and Coblis) the comparison between real and simulated dichromats (tool accuracy evaluation; Figures 9 and 10) was appropriate.

Simulcheck is a consistent method because it leads to similar conclusions even when using colorimetrically different sets (Maximum Chroma or Constant Chroma sets). For example, when considering the results summarized in Figures 9 and 10 (tool accuracy evaluation), both the Maximum Chroma and Constant Chroma bars lead to conclude the following: (1) Coblis

simulations were inaccurate for both dichromats types, (2) Variantor-simulated dichromats were very similar to real protanopes (small and frequently no significant differences) but not to real deuteranopes, and (3) only Vischeck simulations were accurate for both protanopes and deuteranopes. Nevertheless, we recommend the use of the Constant Chroma set for potential users of Simulcheck because it is not so dependent on the color gamut of the monitor used to implement the method.

The high validity of the Vischeck algorithm was indicated by the high agreement found between the predictions derived from Brettel et al. (1997)⁷ and the empirical h_{uv} and L_R values provided by real dichromats (see Table 2 and the bars labeled “real” in Figures 11 and 12). The only exception was for L_R (Table 2; empirical 95% CI [0.72, 0.88]; predicted, 0.94) in the red pseudoachromatic Constant Chroma condition. Even in this case the value type (<1) was accurately predicted.

Apart from Simulcheck’s results, there was high colorimetric similarity between the performed color transformation (Figures 4A and 5A; Table 1) and the predictions derived from Brettel et al. (1997). As expected, the transformed color coordinates were near to $\lambda_d = 575$ and 475 nm, indicating high implementation accuracy. Returning to Simulcheck, qualitative analysis (see Footnote 6) based on h_{uv} and L_R values can be used not only to synthesize the results provided by the evaluation of a color transformation tool but also to define a series of requisites that must be fulfilled by any algorithm or simulation tool that can be considered accurate: (1) It must provide different color transformations for each dichromat type (something not done by Variantor; see Figure 6), and (2) the specific h_{uv} and L_R values for the pseudoachromatic reds and greens must show specific relations. The h_{uv} values are more in the clockwise direction for deuteranopes (see Figure 7 and Table 2, upper part), and L_R values for the pseudoachromatic reds are smaller when simulating protanopes (the opposite for the greens; reverse pattern when simulating deuteranopes; see Figure 8 and Table 2, lower part).

Assessing a simulation tool using the h_{uv} and L_R variables has two important advantages. First, it explicitly differentiates between two aspects of color vision: the activity in the yellow–blue mechanism (a qualitative aspect, measured through h_{uv}) and the activity in the achromatic mechanism (a quantitative aspect, measured through L_R). It must be remembered that each of these aspects is usually associated with a different color use (Breslow et al., 2009). Second, this makes it easier to understand the consequences of a simulation error. Let’s use an example to illustrate this. The rightmost bars in Figure 9 indicate that, as we commented before, there were important differences between the values of the pseudoachromatic angles of

Coblis simulations and real dichromats. Real protanopes and deuteranopes both selected h_{uv} values near 180° (Figure 7), a bluish green emerald for normal observers. On the contrary, Coblis values were near 140° (–40° in Figure 9), a chromatic angle that for normal observers is related with pure (no bluish) greens. Consequently, if Coblis is used to decide, for example, which colors must not be side by side on a political map (to help image perceptual segmentation, see Francis, Bias, & Shive, 2010), important errors can appear. The probability of errors associated with Coblis use is increased when considering its inaccuracy in measuring L_R (Figure 10). More specifically, although we found that relative to normals real protanopes see green pseudoachromatics as lighter (L_R values near 1.17) but the red ones as darker (L_R under 0.84), Coblis simulations provided exactly the opposite pattern. This is a very significant error considering that the reduced sensitivity of the protanopes to long wavelengths (see, e.g., Birch, 2001) has led some authors (see McIntyre, 2002, for a recent example) to refer to “red blindness” for naming protanopes.

There is great conceptual similarity between Simulcheck and the test designed to assess color vision in macaque monkeys (Koida et al., 2013). Both methods use two psychophysical tasks. The first task (Pseudoachromatic Stimuli Identification task in our nomenclature) allows the determination of pseudoachromatic angles (h_{uv}). Both for monkeys and humans, protanope h_{uv} values were near 0° (pseudoachromatic reds) and 180° (pseudoachromatic greens). The second task (Minimum Achromatic Contrast task in Simulcheck) had a similar goal in both studies: the evaluation of the relative response of the achromatic mechanism. Again, similar results appeared in this case. Protanopes (the only type of dichromat among Koida’s monkeys) showed reduced sensitivity to long-wavelength stimuli (the only stimuli type used in the second task with the monkeys).

Simulcheck is a method that can be described as versatile (can be used for evaluating tool accuracy and algorithm validity), consistent (provides qualitatively similar results using different stimulus sets), selective (evaluates, through h_{uv} and L_R , two different color visions mechanisms), and useful (makes it easy to understand the inaccuracies of simulation tools). In our opinion, its main limitation is that it assumes permanent functional dichromatism in people diagnosed as protanope or deuteranope. This is inaccurate because it leads to an underestimation of the color vision capacities of these groups of people.

In a paper originally published in German titled “Dichromatische Fovea, Trichromatische Peripherie” (“Dichromatic Fovea, Trichromatic Periphery”; for a short description of the Nagel works, see Broackes [2010a] or Smith & Pokorny [1977]), Wilibald Nagel

(1905) showed that many diagnosed dichromats, like himself, behaved as expected for dichromats when responding to small stimuli (e.g., the ones used in the standard Nagel anomaloscope) but as expected for anomalous trichromats when responding to bigger stimuli. Although this discovery was ignored for a long time, several works (Boynton & Scheibner, 1967; Lillo, Moreira, Álvaro, & Davies, 2014; Moreira et al., 2014; Nagy, 1980; Scheibner & Boynton, 1968; Smith & Pokorny, 1977) have confirmed and extended Nagel's discovery: Big stimuli ($>3^\circ$) improve the capacity of clinical dichromats to discriminate stimuli (this changes from dichromacy to anomalous trichromacy). This improvement can be related to some kind of residual activity in the red–green mechanism.

As stated in the Introduction, valid and accurate simulation tools make isochromatic those stimuli that differ only in terms of the response in the cone type that a dichromat lacks. Such transformation is fully valid when, as happens in conventional underground maps, the size of visual elements is small. For example, the tool makes it possible to know which lines are seen by the dichromat as having similar color. However, this color transformation can be less accurate when, as happens for some political maps, there are relatively big visual elements (i.e., color background). In this case, some clinically diagnosed dichromats will become anomalous trichromats and the residual activity in their red–green mechanism will allow the differentiation between some stimuli that are pseudoisochromatic for a true dichromat.

Because of the influence of red–green residual activity, it is possible that the best simulation tool leads us to the erroneous conclusion that big stimuli are pseudoisochromatic. Adopting such a conservative criterion is not a serious problem when performing universal design because this error only leads to the avoidance of the simultaneous use of stimuli that are very similar for some people (clinical diagnosed dichromats). Consequently, such a conservative criterion avoids difficult differentiations and makes performance in some color-based tasks easier.

Simulcheck's first task (Pseudoachromatic Stimuli Identification) allows us to know which chromatic angles are associated with minor responses in the dichromats' yellow–blue mechanism. This choice makes the task relatively easy because h_{uv} variation in the proximities of the pseudoachromatic stimuli produces qualitative changes (hue varies from blue to yellow or vice versa) that are easy to appreciate. These changes would not appear if the same kind of choice task were used to identify the h_{uv} that produces maximum responses in the yellow–blue mechanism. This kind of information (maximum chroma identification) would complement the one actually provided by Simulcheck (good simulation tools must be accurate in both aspects) but would require the exclusive use of the Constant

Chroma set (see Figure 1) to avoid unwanted variations in the chromatism perceived by dichromats. We are now considering how to change Simulcheck's first task to get information about h_{uv} values associated with the yellow–blue mechanism's minimum and maximum responses.

Even when considering the effects of the residual activity of the red–green mechanism or possible improvements related to the availability of information about yellow–blue maximum responses, it can be concluded that Simulcheck is a useful method for selecting among an increasing number of simulation tools the ones that make it possible to perform color universal designs. Simulcheck requires the measurement of only two key colorimetric variables— h_{uv} and L_R —for two pseudoachromatic grays and can be described as versatile, consistent, selective, and useful. Its application in the present study indicated that, among the evaluated tools, only Vischeck provided an accurate simulation of the colors for both protanopes and deuteranopes.

Keywords: red–green color blindness, dichromacy, psychophysics, forced choice, simulation tools evaluation, computer simulation, optical simulation

Acknowledgments

This research was supported by grant PSI2008-04166 from Ministerio de Ciencia e Innovación, grant PSI2012-37778 from Ministerio de Economía y Competitividad, and by research fellowship BE48/09 from Universidad Complutense de Madrid. The authors would like to thank M. C. Durán and D. Majarín for help with data processing, J. A. Aznar for thoughtful and insightful comments on earlier versions of this article, and two anonymous reviewers for their helpful comments and suggestions.

Commercial relationships: none.

Corresponding author: Julio Lillo.

Email: julillo@psi.ucm.es.

Address: Departamento de Psicología Diferencial y del Trabajo, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Spain.

Footnotes

¹Brettel et al. (1997) used \mathbf{Q} for an original stimulus and \mathbf{Q}' for the one that normals and dichromats saw with the same color (\mathbf{Q}' = transformed stimulus). They used the LMS colorimetry (based on the response of L, M, S cones) to decide which \mathbf{Q}' ($\mathbf{Q}' = L_{Q'}, M_{Q'}, S_{Q'}$) correspond to every specific \mathbf{Q} ($\mathbf{Q} = L_Q, M_Q, S_Q$). The specification is based on the following assumptions: (1)

Dichromats and trichromats have the same perceptions when seeing equienergetic stimuli, and (2) for dichromats, LMS space is reduced to two half-planes (those corresponding to 575 or 475 nm). In the LMS space, each confusion line is parallel to an axis: the L ($M_{Q'} = M_Q$ and $S_{Q'} = S_Q$) for the protanopes and the M ($L_{Q'} = L_Q$ and $S_{Q'} = S_Q$) for the deuteranopes. Q' coordinates are determined by the intersection between (A) the confusion line and (B) the half-plane defined by the origin (O), the equienergetic stimulus E, and the corresponding monochromatic stimuli (575 or 475 nm).

²Two radii of Figure 1 specify the chromatic angle (h_{uv}) of a stimulus. One (not shown) corresponds to the horizontal line extended from the achromatic point to the right of the diagram. The other is the radius including the stimulus. All the stimuli sharing a dominant wavelength (i.e., $\lambda_d = 494$ nm) also share a chromatic angle (i.e., $h_{uv} = 183.95^\circ$).

³The intersection of dashed and dotted lines in Figure 1 defines achromatic point coordinates (the ones corresponding to the screen white). The black line originates in the protanope convergence point (not shown; $u' = 0.656$, $v' = 0.5051$) and finishes in 494 nm. Stimuli represented by a point in the radius, extended between the achromatic point and the 494-nm position (black dotted segment), have such dominant wavelength ($\lambda_d = 494$ nm). Stimuli represented by the complementary radius (black dashed segment) have a negative dominant wavelength ($\lambda_d = -494$ nm). Negative values are used for radii ending in the purple line (the one extended between 400 and 700 nm in the diagram) because there are no monochromatic stimuli included in the purple line.

⁴Transformed luminance (L_T) was named “effective luminance (Y_E)” in previous AMLA (AM = achromatic measurement, LA = luminosity adjustment) descriptions. The main variable provided by the AMLA method was named “relative effective luminance (Y_{ER})” and derives from comparing target stimulus (Y_E) and reference white (Y_{EN}) effective luminances ($Y_{ER} = Y_E/Y_{EN}$). This variable (Y_{ER}) is very similar to the luminance factor (β) in standard photometry (i.e., Hunt & Pointer, 2011, appendix 1). AMLA assumes that standard and effective luminances have the same level ($Y_E = Y$) for achromatic stimuli but not ($Y_E \neq Y$) for chromatic ones. Consequently, their Y_E level is determined using the following procedure: (1) Some psychophysical task is used to know which achromatic stimulus has the same Y_E as the target chromatic stimulus (LA = luminosity adjustment). (2) The achromatic stimuli standard luminance (Y) is measured (AM = achromatic measurement). It is assumed that the result is the target chromatic stimulus effective luminance (Y_E).

⁵Despite the similarity in their denominations, Y_{ER} (relative effective luminance, included in previous

AMLA descriptions; see Footnote 4) and L_R (relative luminance, included in Simulcheck) refers to two different kind of comparisons where stimulus effective luminance (Y_E) is used. Y_{ER} results from comparing Y_E with the assumed maximum (luminance of the reference white). L_R results from comparing Y_E with normal observers’ effective luminance. To avoid conceptual confusion between both variables, in this paper (1) naming of variables related to luminance includes “ L ” (as is usual in photometry; i.e., Hunt & Pointer, 2011, appendix 1) and not Y (as is usual in colorimetry; i.e., Hunt & Pointer, 2011, chapter 2) and (2) instead of “effective luminance (Y_E),” the expression “transformed luminance (L_T)” is used.

⁶Figure 1 helps to differentiate quantitative and qualitative predictions. As can be seen, for example, the radius ending near 700 nm is intersected in different localizations by the circle (Constant Chroma set) and the triangle (Maximum Chroma set). Because the radius is the same (one corresponding to reddish colors), the same qualitative prediction was done for both sets. The L_R value was under one for protanopes because for this type of colors the effective luminance must be under the standard. On the other hand, because the intersections differ in their distance to the achromatic point, there were different quantitative predictions for both sets. The predicted L_R was smaller for the Maximum Chroma set.

⁷The algorithm of Brettel et al. (1997) uses LMS colorimetry to specify the colors that supposedly elicit the same perceptions in normal trichromats and dichromats (see Footnote 1). We used LMS colorimetry to predict L_R values and a standard chromaticity diagram to predict h_{uv} values. This is a traditional and usual way to represent the confusion lines for dichromats (Hunt & Pointer, 2011; Kaiser & Boynton, 1996; Smith & Pokorny, 2003; Wyszecki & Stiles, 1982), so we have used it for simplicity and to directly link the predictions to the expected behavior of our subjects.

References

- Birch, J. (2001). *Diagnosis of defective color vision*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Boynton, R. M., & Scheibner, H. (1967). On the perception of red by red-blind observers. *Acta Chromatica*, 1, 205–220.
- Breslow, L. A., Trafton, J. G., & Ratwani, R. M. (2009). A perceptual process approach to selecting color scales for complex visualizations. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 15, 25–34, doi: 10.1037/a0015085.

- Brettel, H., Viénot, F., & Mollon, J. D. (1997). Computerized simulation of color appearance for dichromats. *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*, 14, 2647–2655, doi:10.1364/JOSAA.14.002647.
- Broackes, J. (2010a). Unilateral colour vision defects and the dimensions of dichromat experience. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 30, 672–684, doi:10.1111/j.1475-1313.2010.00774.x.
- Broackes, J. (2010b). What do the color-blind see? In J. Cohen & M. Matten (Eds.), *Color ontology and color science* (pp. 291–405). London: MIT Press.
- Byrne, A., & Hilbert, D. R. (2010). How do things look to the color-blind? In J. Cohen & M. Matten (Eds.), *Color ontology and color science* (pp. 259–290). London: MIT Press.
- Capilla, P., Díez-Ajenjo, M. A., Luque, M. J., & Malo, J. (2004). The corresponding pair procedure: A new approach to simulation of dichromatic colour perception. *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*, 21, 176–186, doi:10.1364/JOSAA.21.000176.
- Carroll, J., Neitz, J., & Neitz, M. (2002). Estimates of L:M cone ratio from ERG flicker photometry and genetics. *Journal of Vision*, 2(8):1, 531–542, <http://www.journalofvision.org/content/2/8/1>, doi:10.1167/2.8.1. [PubMed] [Article]
- De Valois, R. L., & De Valois, K. K. (1988). *Spatial vision*. Oxford: Oxford University Press.
- Fletcher, R., & Voke, J. (1985). *Defective color vision: Fundamentals, diagnosis and management*. Bristol and Boston: Adam Hilger.
- Fletcher, R. J. (1980). *The City University color vision test* (2nd ed.). London: Keeler.
- Francis, G., Bias, K., & Shive, J. (2010). The psychological four-color mapping problem. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 16, 109–123, doi:10.1037/a0019095.
- Gegenfurtner, K. R., Wichmann, F. A., & Sharpe, L. T. (1998). The contribution of color to visual memory in X-chromosome-linked dichromats. *Vision Research*, 38, 1041–1045, doi:10.1016/S0042-6989(97)00200-9.
- Hemmi, J. M., James, A., & Taylor, R. (2002). Color opponent retinal ganglion cells in the tammar wallaby retina. *Journal of Vision*, 2(9):3, 608–617, <http://www.journalofvision.org/content/2/9/3>, doi:10.1167/2.9.3. [PubMed] [Article]
- Hunt, R. W. G., & Pointer, M. R. (2011). *Measuring colour* (4th ed.). Chichester, England: John Wiley & Sons, doi:10.1002/9781119975595.
- Ishihara, M. D. (1996). *Ishihara's tests for colour-deficiency: 24 plates edition*. Tokyo: Kanehara & Co.
- Kaiser, P. K., & Boynton, R. M. (1996). *Human color vision* (2nd ed.). Washington, DC: Optical Society of America.
- Koida, K., Yokoi, I., Okazawa, G., Mikami, A., Widayati, K. A., Miyachi, S., et al. (2013). Color vision test for dichromatic and trichromatic macaque monkeys. *Journal of Vision*, 13(13):1, 1–15, <http://www.journalofvision.org/content/13/13/1>, doi:10.1167/13.13.1. [PubMed] [Article]
- Lanthony, P. (1985). *Album tritan*. Paris: Luneau Optalmologie.
- Lewis, A., & Zhaoping, L. (2006). Are cone sensitivities determined by natural color statistics? *Journal of Vision*, 6(3):8, 285–302, <http://www.journalofvision.org/content/6/3/8>, doi:10.1167/6.3.8. [PubMed] [Article]
- Lillo, J., Collado, J., Martín, J., & García, Y. (1999). A fast and easy psycho-physical procedure to adjust luminance and achromatic contrast in conventional video display terminals (VDT). In D. Harris (Ed.), *Engineering psychology and cognitive ergonomics: Vol. 4. Job design, product design and human-computer interaction* (pp. 131–140). Aldershot: Ashgate.
- Lillo, J., & Moreira, H. (2004). Color blindness. In C. Spilberger (Ed.), *Encyclopedia of applied psychology* (pp. 411–420). Oxford: Elsevier Academic Press, doi:10.1016/B0-12-657410-3/00957-0.
- Lillo, J., & Moreira, H. (2005). Relative luminance and figure-background segmentation problems: Using AMLA to avoid no-discernible stimuli pairs in common and colour blind observers. *Psicológica*, 26, 189–207.
- Lillo, J., & Moreira, H. (2013). *Percepción del color y daltonismos: Descripción, diagnóstico e intervención*. Madrid: Pirámide.
- Lillo, J., Moreira, H., Álvaro, L., & Davies, I. (2014). Use of basic color terms by red-green dichromats: 1. General description. *Color Research and Application*, 39, 360–371, doi:10.1002/col.21803.
- Logvinenko, A. D. (2014). On the colours dichromats see. *Color Research and Application*, 39, 112–124, doi:10.1002/col.21787.
- Luque, M. J., Fez, D., & Acevedo, P. (2014). Software for simulating dichromatic perception of video streams. *Color Research and Application*, X, in press.
- McIntyre, D. (2002). *Colour blindness: Causes and effects*. United Kingdom: Dalton Publishing.
- Moreira, H., Lillo, J., Álvaro, L., & Davies, I. (2014).

- Use of basic color terms by red-green dichromats: 2. Models. *Color Research and Application*, 39, 372–386, doi:10.1002/col.21802.
- Nakauchi, S., & Onouchi, T. (2008). Detection and modification of confusing color combinations for red-green dichromats to achieve a color universal design. *Color Research and Application*, 33, 203–211, doi:10.1002/col.20404.
- Nagel, W. A. (1905). Dichromatische fovea, trichromatische peripherie. *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie Sinnesorgane*, 39, 93–101.
- Nagy, A. L. (1980). Large-field color matches of dichromats. *Journal of the Optical Society of America*, 70, 778–784.
- Pardo, P. J., Pérez, A. L., & Suero, M. I. (2001). Characterization of dichromat and observers using a PC-based anomaloscope. *Displays*, 22, 165–168, doi:10.1016/S0141-9382(01)00066-X.
- Pardo, P. J., Pérez, A. L., & Suero, M. I. (2004). Validity of TFT-LCD displays for colour deficiency research and diagnosis. *Displays*, 25, 159–163, doi:10.1016/j.displa.2004.09.006.
- Remington, R. W., Johnston, J. C., Ruthruff, E., Gold, M., & Romera, M. (2000). Visual search in complex displays: Factors affecting conflict detection by air traffic controllers. *Human Factors*, 42, 349–366, doi:10.1518/001872000779698105.
- Scheibner, H., & Boynton, R. M. (1968). Residual red-green discrimination in dichromats. *Journal of the Optical Society of America*, 58, 1151–1158.
- Sharpe, L. T., Stockman, A., Jägle, H., & Nathans, J. (1999). Opsin genes, cone photopigments, color vision, and color blindness. In K. R. Gegenfurtner & L. T. Sharpe (Eds.), *Color vision: From genes to perception* (pp. 3–51). Cambridge: Cambridge University Press.
- Smith, V. C., & Pokorny, J. (1977). Large-field trichromacy in protanopes and deuteranopes. *Journal of the Optical Society of America*, 67, 213–220.
- Smith, V. C., & Pokorny, J. (2003). Color matching and color discrimination. In S. K. Shevell (Ed.), *The science of color* (2nd ed., pp. 103–148). Amsterdam: Optical Society of America.
- Spence, I., Kutlesa, N., & Rose, D. L. (1999). Using color to code quantity in spatial displays. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 5, 393–412, doi:10.1037/1076-898X.5.4.393.
- Spence, I., Wong, P., Rusan, M., & Rastegar, N. (2006). How color enhances visual memory for natural scenes. *Psychological Science*, 17, 1–6, doi:10.1111/j.1467-9280.2005.01656.x.
- Stockman, A., MacLeod, D. I. A., & Johnson, N. E. (1993). Spectral sensitivities of the human cones. *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*, 10, 2491–2521, doi:10.1364/JOSAA.10.002491.
- Stockman, A., & Sharpe, L. T. (2000). Spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. *Vision Research*, 40, 1711–1737, doi:10.1016/S0042-6989(00)00021-3.
- Suero, M. I., Pardo, P. J., & Pérez, A. L. (2010). Colour characterization of handheld game console displays. *Displays*, 31, 205–209, doi:10.1016/j.displa.2010.09.004.
- Vanderheiden, G. C. (2006). Design for people with functional limitations. In G. Salvendy (Ed.), *Handbook of human factors and ergonomics* (3rd ed., pp. 1387–1417). New York: Wiley, doi:10.1002/0470048204.ch53.
- Velisavljević, L., & Elder, J. H. (2008). Visual short-term memory of local information in briefly viewed natural scenes: Configural and non-configural factors. *Journal of Vision*, 8(16):8, 1–17, <http://www.journalofvision.org/content/8/16/8>, doi:10.1167/8.16.8. [PubMed] [Article]
- Viénot, F., Brettel, H., & Mollon, J. D. (1999). Digital video colourmaps for checking the legibility of displays by dichromats. *Color Research and Application*, 24, 243–252, doi:10.1002/(SICI)1520-6378(199908)24:4<243::AID-COL5>3.0.CO;2-3.
- Vorobyev, M. (2004). Ecology and evolution of primate colour vision. *Clinical and Experimental Optometry*, 87, 230–238, doi:10.1111/j.1444-0938.2004.tb05053.x.
- Wyszecki, G., & Stiles, W. S. (1982). *Color science: Concepts and methods, quantitative data and formulae* (2nd ed.). New York: Wiley.
- Yamani, Y., & McCarley, J. S. (2010). Visual search asymmetries within color-coded and intensity-coded displays. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 16, 124–132, doi:10.1037/a0019570.

Color preference in red–green dichromats

Leticia Álvaro^{a,1}, Humberto Moreira^a, Julio Lillo^a, and Anna Franklin^{b,c,1}

^aFacultad de Psicología, Universidad Complutense de Madrid, 28223 Pozuelo de Alarcón, Spain; ^bSchool of Psychology, University of Sussex, Falmer BN1 9QH, United Kingdom; and ^cThe Sussex Colour Group, University of Sussex, Falmer BN1 9QH, United Kingdom

Edited by Dale Purves, Duke University, Durham, NC, and approved June 12, 2015 (received for review February 2, 2015)

Around 2% of males have red–green dichromacy, which is a genetic disorder of color vision where one type of cone photoreceptor is missing. Here we investigate the color preferences of dichromats. We aim (i) to establish whether the systematic and reliable color preferences of normal trichromatic observers (e.g., preference maximum at blue, minimum at yellow–green) are affected by dichromacy and (ii) to test theories of color preference with a dichromatic sample. Dichromat and normal trichromat observers named and rated how much they liked saturated, light, dark, and focal colors twice. Trichromats had the expected pattern of preference. Dichromats had a reliable pattern of preference that was different to trichromats, with a preference maximum rather than minimum at yellow and a much weaker preference for blue than trichromats. Color preference was more affected in observers who lacked the cone type sensitive to long wavelengths (protanopes) than in those who lacked the cone type sensitive to medium wavelengths (deutanopes). Trichromats' preferences were summarized effectively in terms of cone-contrast between color and background, and yellow–blue cone-contrast could account for dichromats' pattern of preference, with some evidence for residual red–green activity in deutanopes' preference. Dichromats' color naming also could account for their color preferences, with colors named more accurately and quickly being more preferred. This relationship between color naming and preference also was present for trichromat males but not females. Overall, the findings provide novel evidence on how dichromats experience color, advance the understanding of why humans like some colors more than others, and have implications for general theories of aesthetics.

dichromacy | aesthetic preference | color vision | color naming

Individuals vary in their perceptual experience of the world, and sometimes this variation is caused by genetic differences (1–4). Dichromacy is a form of color-vision deficiency affecting about 2% of human males in which only two of the three types of retinal cone photoreceptors are functional because of genetic factors (1, 2). Protanopes, deutanopes, and tritanopes lack cone photoreceptors sensitive to long (L), medium (M), and short (S) wavelengths, respectively. Accordingly, dichromats' color discrimination is poorer, and their spectral sensitivity is slightly shifted to longer wavelengths (deutanopes) or is moderately shifted to shorter wavelengths (protanopes) compared with that of normal trichromats (common observers; see table 3.6 in ref. 5).

In normal trichromats, cone responses are the input signals for two chromatic cone opponent mechanisms, red–green and yellow–blue, based on L–M and S–(L+M) cone responses, respectively, and one achromatic mechanism, mainly based on L+M responses (1). Traditionally it has been considered that protanopes and deutanopes lack functionality in the red–green mechanism, because this opponent mechanism is based on the comparison of L and M cone responses, and one of those cone types is affected. (Thus such observers are called “red–green dichromats.”) However, research also has shown that a large proportion of red–green dichromats have residual activity in this mechanism with increasing stimulus size (over 3°; see refs. 6, 7), resulting in surprisingly good color naming (8–11). The origin of such red–green residual activity remains unknown and is open to several explanations (7, 10, 12, 13). Other research has shown that protanopes and deutanopes also exhibit minor alterations in the performance of the achromatic and yellow–blue mechanisms (see figures 4 and 5 in ref. 14). These functional

alterations in red–green dichromacy also affect color naming: Moreira et al. (15) have developed a model that explains 94% of the color-naming variance in protanopes and 96% of that in deutanopes. The color naming of dichromats suggests that, at least in some circumstances, dichromat color perception is supported by red–green residual activity ($R-G_{res}$), in addition to yellow–blue and achromatic mechanisms (modeled as s' and L^*_T in ref. 15). These mechanisms also might be relevant for other aspects of dichromats' color perception, such as color preference.

Although there has been much research on dichromats, their affective response to color has not been systematically investigated previously. Some visual simulations of how different stimuli appear to dichromats (16) have been demonstrated to work reasonably well (17). For example, these simulations suggest that some hues that appear reddish to common observers would appear desaturated and brownish for dichromats—a hue that normal trichromats typically dislike (18). Do dichromats also dislike a brownish appearance? Alternatively, if dichromats perceive a brownish appearance more commonly than trichromats, does this increased perception alter their preference for that appearance relative to other hues? Could dichromats' and trichromats' color preferences, like naming, be surprisingly similar if a residual red–green mechanism feeds into dichromats' color preference?

Investigating color preference in dichromats may provide insight into how they perceive color and also may shed light on the origins of color preference and inform ways to test further theories and models of color preference. Decades of color research have indicated a systematic pattern of preference in trichromats: Blue hues are commonly preferred, and yellow–green hues are commonly disliked (18–20). This pattern has been so systematic across studies that some have claimed it is universal, although others have pointed out that cross-cultural differences in color preference can be found also (21). Patterns of color preference have been explained in terms of the emotional response to color (22) and in terms of the valence of objects associated with colors (18).

Another theory is that color preferences can be summarized in terms of the cone contrast between a color and its background

Significance

Around 2% of males have red–green dichromacy, which is a genetic disorder of color vision that affects how well certain colors can be seen and discriminated. Humans with normal color vision are known to have systematic and reliable preferences for some colors over others (e.g., blue is liked and yellow–green is disliked). We show that red–green dichromats have a different reliable pattern of color preference in which, for example, yellow is the most, not the least, preferred color. We test current theories of color preference and provide novel evidence that how easily a color can be named is related to how much it is liked. The findings further understanding of dichromacy, color preference, and aesthetics in general.

Author contributions: L.Á., H.M., J.L., and A.F. designed research; L.Á. and J.L. performed research; L.Á. and H.M. analyzed data; and L.Á., H.M., J.L., and A.F. wrote the paper.

The authors declare no conflict of interest.

This article is a PNAS Direct Submission.

¹To whom correspondence may be addressed. Email: lalvaro@ucm.es or anna.franklin@sussex.ac.uk.

This article contains supporting information online at www.pnas.org/lookup/suppl/doi:10.1073/pnas.1502104112/-DCSupplemental.

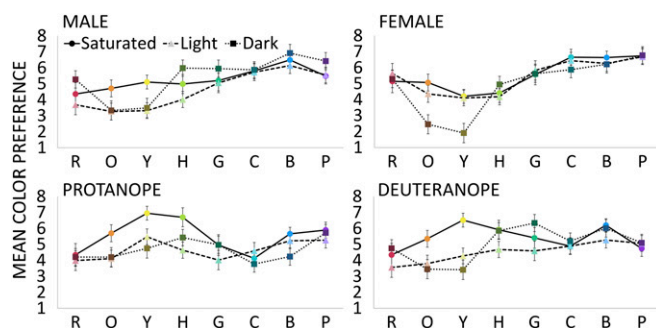


Fig. 1. Mean preference ratings (\pm SEM) for 24 colors from the saturated, light, and dark sets, averaged for trichromatic males and females and dichromatic protanopes and deuteranopes. The x axis gives the hue: red (R), orange (O), yellow (Y), chartreuse (H), green (G), cyan (C), blue (B), and purple (P). Marker colors are only an approximation of those in the experiment.

(19). Supporting this theory, around 70% of the variance in preference across a set of hues could be explained by L–M and S–(L+M) cone contrasts for British and Chinese trichromats (19). However, other studies have failed to account for this much of the variance with cone contrasts alone (18, 21). Palmer and Schloss (18) extended the model, adding achromatic contrast and saturation as predictors, but accounted for only 37% of the variance. If the cone-contrast model works, we should find altered patterns of color preference in dichromats that reflect their altered color vision. If so, we should be able to model dichromat color preference, as Moreira et al. (15) did for color naming, using a model tailored for dichromats' altered cone-opponent mechanisms.

The current study investigates color preference in male dichromat (protanopes and deuteranopes) and trichromat observers (males and females). Color preference was measured for a set of 24 colors from the Berkeley Color Project (BCP) (18), comprising saturated, light, and dark versions of eight hues used in prior studies of trichromat color preference (18, 20, 21) and also the focal colors of the basic color categories (Fig. S1). The type of dichromacy was confirmed through the use of a set of color-vision tests including the Nagel anomaloscope. Observers rated their preference for the colors twice and also named the colors. Color preferences were compared across groups. To test the cone-contrast model, trichromat color preferences were modeled with trichromat cone contrasts as in Hurlbert and Ling (19). Dichromat color preferences then were modeled with cone contrasts that take into account dichromats' altered cone responses. In addition, we explore the relationship between color naming and color preference in dichromats and trichromats, investigating whether color categorization, accuracy, speed, and consistency of naming predict how much a color is preferred.

Results

Reliability. To check that participants have reliable color preferences, the individuals' preference ratings were averaged within each group and were correlated for the two times that colors were rated. Preferences showed high and significant correlations for the four groups (male, $r = 0.98$; female, $r = 0.97$; protanope, $r = 0.94$; deuteranope, $r = 0.95$, all $P < 0.01$). Preference also was reliable at the individual level (SI Text).

Normal Trichromat and Dichromat Color-Preference Curves. Fig. 1 shows color-preference curves (preference plotted as a function of hue). The pattern of preferences for native Spanish normal trichromats in the current study is highly similar to those of normal trichromats from the United States (18) and the United Kingdom (20): Trichromats have the lowest preference for some yellowish-greenish hues, and preference rises steadily with increasing greenness, with a maximum around blue (Fig. 1 *male* and *female*). In contrast, dichromats have a distinctly different color-preference pattern (Fig. 1 *protanope* and *deuteranope*). For

protanopes, preference is fairly flat across dark and light sets, but there is clear variation for saturated colors, for which preference peaks at yellow, with a minimum at cyan and red. Deuteranopes appear more similar than protanopes to male trichromats in their preference, particularly for light and dark sets. However, deuteranopes' preference curve for saturated colors, like that for protanopes, has a peak at saturated yellow rather than at saturated blue, as seen for trichromatic males (see SI Text for analyses of the similarity in color-preference curves).

The pattern of color preference for focal colors (Fig. 2) is similar to that of the saturated set (Fig. 1) for all four groups. As seen for the BCP stimulus set, preference for focal yellow was elevated for dichromats relative to trichromats. For the desaturated focal color categories (Fig. 2, *Center*), only females had a high preference for focal pink, and all four groups had a low preference for focal brown. For the achromatic categories, male trichromats appear to like white more than the other groups.

To specify group differences in preference for specific hues, two sets of ANOVAs were conducted, one on the BCP stimulus set (Fig. 1) and another on the focal stimulus set (Fig. 2). For the BCP stimuli, a mixed-model ANOVA with set (saturated, light, and dark), color [red (R), orange (O), yellow (Y), chartreuse (H), green (G), cyan (C), blue (B), and purple (P)], and group (trichromat males, trichromat females, protanopes, and deuteranopes) was conducted on preference ratings, with the Greenhouse–Geisser correction applied when appropriate. This analysis revealed significant main effects of set [$F(1.82,60) = 6.49$, $P < 0.01$] and color [$F(4.30,60) = 16.62$, $P < 0.001$] and interactions of set and color [$F(9.32,60) = 13.39$, $P < 0.001$] and color and group [$F(12.88,60) = 5.19$, $P < 0.001$]. To unpack the interaction relevant to our hypotheses, post hoc one-way ANOVAs on the mean preference for each color (mean for saturated, light, and dark sets) were conducted with group as a factor. These analyses revealed group differences for yellow [$F(3,60) = 9.07$, $P < 0.001$], cyan [$F(3,60) = 6.23$, $P < 0.01$], and purple [$F(3,60) = 3.11$, $P < 0.05$]. Bonferroni-corrected pairwise comparisons revealed that protanopes preferred yellow more than trichromat males ($P < 0.01$), and protanopes preferred cyan less than trichromat males ($P < 0.05$). Comparisons with females are provided in SI Text.

Another mixed-model ANOVA with color [R, O, Y, G, B, P, pink (Pi), brown (Br), black (Bk), gray (Gy), and white (W)] and group on focal preference ratings revealed significant main effects of color [$F(7.04,60) = 20.64$, $P < 0.001$] and an interaction of color and group [$F(21.11,60) = 3.22$, $P < 0.001$]. To investigate this interaction, one-way ANOVAs with group as a factor were conducted on the preference ratings for 11 focal stimuli. These analyses revealed significant group differences for green [$F(3,60) = 3.41$, $P < 0.05$], yellow [$F(3,60) = 5.23$, $P < 0.01$], pink [$F(3,60) = 6.90$, $P < 0.001$], and black [$F(3,60) = 3.12$, $P < 0.05$]. Bonferroni-corrected pairwise comparisons did not show significant differences between dichromat and trichromat males for any color. For several colors, however, dichromat and male color preferences differed from those of females (SI Text).

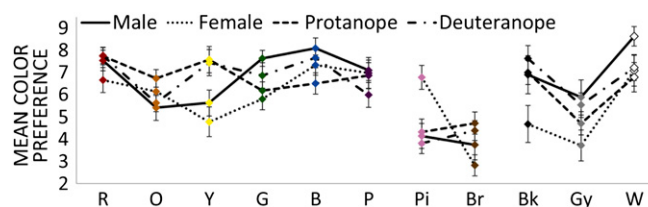


Fig. 2. Mean preference ratings (\pm SEM) for 11 colors from the focal set, averaged for trichromatic males (solid line) and females (dotted line), dichromatic protanopes (dashed line), and deuteranopes (dotted and dashed line). The x axis gives the basic color term for the focal saturated color categories (Left), the desaturated color categories of pink and brown (Center), and the achromatic categories (Right): red (R), orange (O), yellow (Y), green (G), blue (B), purple (P), pink (Pi), brown (Br), black (Bk), gray (Gy), and white (W). Marker colors are only an approximation of those in the experiment.

Predictors of Color Preference: Cone Contrast, Lightness, and Saturation.

As in Hurlbert and Ling (19), we analyzed color-preference data (excluding foci) in terms of the two dimensions of opponent cone-contrast space (23). [The focal set has been excluded from these analyses to provide analyses that are comparable to previous research (19, 21), which did not include focal colors. In addition L–M and S–(L+M) will fail to account for the preference of the three achromatic foci.] L–M and S–(L+M) cone contrasts between stimulus and background were calculated (*SI Text*) and entered as predictors in linear regressions with average color-preference ratings as the outcome variable. We conducted separate regressions for each group of observers. The cone-contrast model significantly accounted for just under half of the variance in the average pattern of color preference for the BCP color set for normal trichromats (Table 1), but for dichromats this model accounted for less variance and was not significant (and therefore is not included in Table 1). S–(L+M) was the only significant predictor for trichromat males [$t = 2.65$, $P < 0.05$] and females [$t = 3.90$, $P < 0.001$]; over a third of the variance was explained by S–(L+M) in a univariate model (Table 1), but L–M was not a significant predictor for any group (all $P > 0.05$). Equivalent regressions with predictors drawn from a multi-stage model that rotates the standard axes into RG, YB (Fig. S2) (24) produced a highly similar pattern of results (*SI Text*). Additional regressions indicated that lightness (L^*) and saturation (s_m) were not significant predictors of trichromats' preferences (*SI Text*).

Hurlbert and Ling (19) applied the cone-contrast model to preference ratings for colors that varied only in hue and accounted for much more variance than seen in subsequent research, which, as here, used BCP stimuli that vary in lightness, saturation, and hue (18, 21). Both Taylor et al. (21) and Palmer and Schloss (18) suggested that this discrepancy could be caused by the cone-contrast model capturing preference better when the stimuli entered into the regression mainly vary in hue. To explore this possibility, we performed separate regressions for each set (saturated, light, and dark) so that the variation in the lightness and the saturation of the stimuli was minimized. Fig. 3 provides the cone contrasts for the three sets (Fig. 3 A–C) and the regression weights when these cone contrasts are entered as predictors of preference for those colors. If cone contrast strongly predicted preference, then the color-preference curves in Fig. 1 should resemble the cone-contrast curves in Fig. 3, and the regression weights should be strong and significant. The cone-contrast model accounted for 75% to almost 100% the variance, depending on color set, for trichromats. S–(L+M) was a significant predictor in these regressions (all $P < 0.05$) (Fig. 3D) except for trichromat males for the saturated set ($P = 0.06$; see Fig. 3D). L–M was a significant predictor only for the trichromat males' preferences in the light set ($t = -1.45$, $P < 0.001$) (Fig. 3E).

The above regressions based on a trichromatic cone-contrast model were repeated for dichromats and, surprisingly, accounted for a significant amount of the variance (78%) for deuteranopes'

preference of the light set, with L–M being a significant predictor ($t = -0.97$, $P < 0.05$) (Fig. 3G). Regressions were conducted to investigate whether corrected variables that take into account dichromats' cone responses (15) for lightness (L^*_T) and saturation (s') (*SI Text*) could predict dichromat color preferences. Transformed lightness (L^*_T) could not account for color preference in dichromats (*SI Text*). Because dichromats' preference curves peaked both at yellow and blue (Fig. 1 *protanope* and *deutanope*) and s' takes positive values for yellowish colors and negative values for bluish colors (*SI Text*), we thought that absolute s' (mechanism activation) was more appropriate for saturation estimations for protanope and deutanope observers. We found $|s'|$ was a significant predictor for protanopes and explained more than 25% of the variance (Table 1). Because s' is related to yellow–blue mechanism activity, we repeated the cone-contrast regressions but with absolute S–(L+M). As expected, similar to $|s'|$, the variance explained by $|S-(L+M)|$ was significant and explained almost two thirds of the variance in protanopes' preference for the full color set and more than three quarters of the preference for saturated and light colors (Fig. 3F). For deuteranopes, $|S-(L+M)|$ was a significant predictor of preference only for saturated colors (Fig. 3F).

Relationship of Color Preference and Color Naming. The naming data were used to group the stimuli according to the 11 terms used (red, green, yellow, blue, orange, pink, purple, brown, black, gray, and white; see *Methods* for corresponding terms in Spanish). For each observer, each category was composed of stimuli consistently named with the appropriate term. One-way ANOVA analyses of preference ratings when stimuli were classified according to each participant's naming showed group differences for yellow [$F(3,216) = 13.38$, $P < 0.001$], blue [$F(3,403) = 8.93$, $P < 0.001$], brown [$F(3,109) = 3.31$, $P < 0.05$], black [$F(3,60) = 3.32$, $P < 0.05$], and pink [$F(3,219) = 8.97$, $P < 0.001$] categories. Bonferroni-corrected comparisons revealed that both groups of dichromats preferred colors named as yellow more than trichromat males ($P < 0.05$), and protanopes preferred blues less than deuteranopes and trichromat males ($P < 0.05$). Female comparisons are given in *SI Text*.

Table S1 gives the frequencies of color names provided by each group. The naming-error rate (a name was considered an error if it was not the modal response of normal trichromats) (11) was significantly larger ($t = 4.49$, $P < 0.001$) in protanopes (39.14%) than in deuteranopes (27.56%). Additional analyses are given in *SI Text*.

In addition, for each stimulus and for each group, naming consistency (the percentage of observers using the same color name in both stimulus presentations) and naming consensus (how much observers within a group agree on the name, the percentage frequency of the most frequent term for that group) were computed. We obtained significant correlations between preference and naming response time (negative), naming-error rate (negative), consistency (positive), and consensus (positive) for all groups except females (Table 2 and Fig. S3).

Table 1. Results for multivariate [L–M and S–(L+M) as predictors (Model)] and univariate [S–(L+M), $|s'|$, L–M, or $|S-(L+M)|$ as predictors] regressions conducted on trichromat or dichromat preference ratings for various stimulus sets

Trichromat preference ratings							Dichromat preference ratings						
Predictor	Set	df	Male		Female		Predictor	Set	df	Protanope		Deutanope	
			F	R ²	F	R ²				F	R ²	F	R ²
Model	BCP	2,21	6.8	0.393*	9.0	0.462**	Model	L	2,5	0.2	0.074	9.0	0.782*
	S	2,5	7.0	0.738*	34.9	0.933**	$ s' $	BCP	1,22	8.4	0.276**	1.9	0.079
	L	2,5	531.7	0.995***	15.9	0.864**	L–M	L	1,6	0.1	0.019	7.0	0.537*
	D	2,5	5.9	0.703*	6.0	0.707*	$ S-(L+M) $	BCP	1,22	34.3	0.609***	3.8	0.146
S–(L+M)	BCP	1,22	9.6	0.305**	18.3	0.454***		S	1,6	19.1	0.761**	6.6	0.524*
	S	1,6	5.5	0.479	76.6	0.927***		L	1,6	42.7	0.877***	3.6	0.375
	L	1,6	22.3	0.788**	36.2	0.858***							
	D	1,6	7.3	0.548*	11.4	0.655*							

Only regressions that are significant (bold) for at least one normal trichromat or dichromat group are reported. BCP, Berkeley Color Project; D, dark; L, light; S, saturated; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

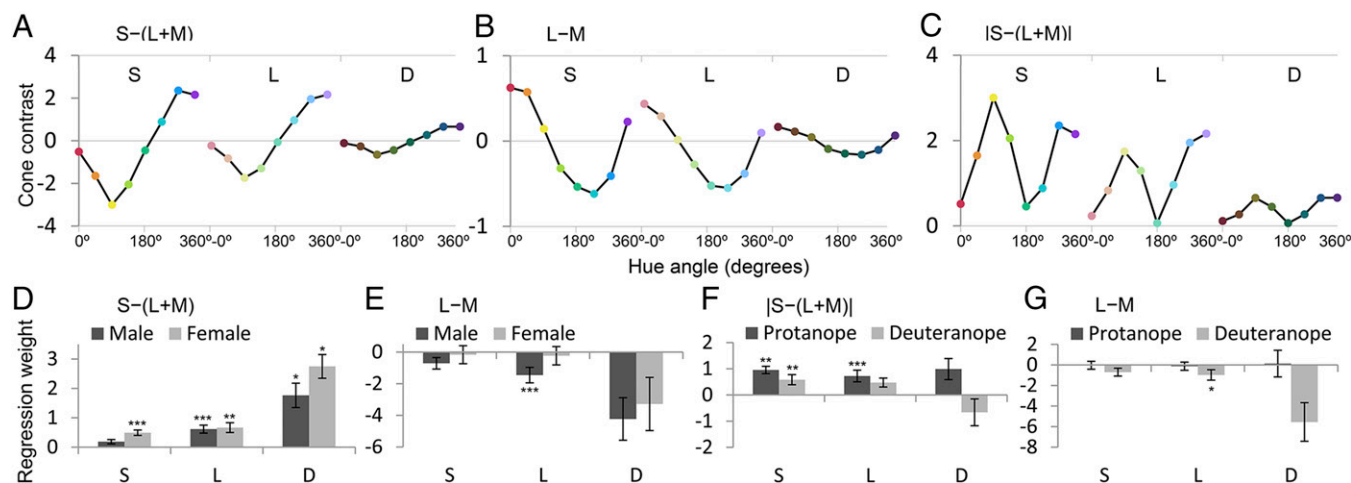


Fig. 3. Values for regression predictors (A–C) and resulting regression weights (D–G). (A–C) $S-(L+M)$ (A), $L-M$ (B), and $|S-(L+M)|$ (C) stimulus–background cone-contrast values for saturated (S), light (L), and dark (D) colors. (D–G) Mean (\pm SEM) individual regression weights when $S-(L+M)$ and $L-M$ are entered as predictors of trichromat preference of saturated, light, and dark colors (D and E) or $|S-(L+M)|$ or $L-M$ is entered as the predictor of dichromat preference (F and G).

An analysis was conducted to investigate whether dichromats preferred colors more if they gave them the same name as trichromats than if they made naming errors. Unpaired t tests revealed that dichromats preferred colors that they named the same as trichromats (preference for hits, P_h) more than those to which they gave different names on at least one of the two naming trials (preference for errors, P_e), and this effect was significant for both protanopes (mean $P_h = 5.41$, mean $P_e = 4.98$, $t = 2.33$ $P < 0.05$) and deuteranopes (mean $P_h = 5.59$, mean $P_e = 4.64$, $t = 5.37$ $P < 0.001$). Additional analyses of error-naming rate are given in *SI Text*.

A final series of multiple regression analyses was performed to evaluate whether adding naming response times to the cone-contrast regressions accounted for more variance in preference. Naming response time was a significant predictor that increased the explained variance for the three male groups ($t = -5.39$, explained variance increased from 39.9 to 75.2%, $P < 0.001$, in trichromat males; $t = -2.19$, explained variance increased from 60.9 to 68.2%, $P < 0.05$, in protanopes; $t = -3.89$, explained variance increased from 14.6 to 50.3%, $P < 0.001$, in deuteranopes) but not for females ($P > 0.05$; the increase in explained variance from 46.2 to 51.8% was not significant).

Discussion

Research on dichromacy has covered various topics such as genetics (2), psychophysics (5), color naming (11, 15), and even color-appearance models (7, 16, 25). Here we provide a novel report of the color preference of red–green dichromats and compare their color preference with the color preference and its explicative mechanisms of normal trichromats, including suitable transformations of such mechanisms for dichromats (L^*_T and s'). In addition, we investigated the relationship between color naming and color preference. We find that dichromats reliably prefer some colors over others, but these preferences do not fit the systematic pattern found in normal trichromats, who commonly prefer blue hues and commonly dislike yellow–green hues (18–20). Instead, saturated yellow was the most preferred color for dichromats, and protanopes' preference for cyan was muted compared with normal trichromats. The patterns of dichromat and trichromat color preference were more similar across the focal colors than for a set of colors that included less typical examples.

Color-preference patterns were summarized in terms of the cone contrasts between stimulus and background, as in Hurlbert and Ling (19), explaining almost half of the variance in trichromat male and female color preference for all colors, with $S-(L+M)$ being the most significant predictor. As in Palmer and Schloss (18) and Taylor and Franklin (20), less variance was explained than

reported in Hurlbert and Ling (19). However, when we modeled preference for colors that varied mainly in hue (as in ref. 19), the explained variance increased substantially, by more than two thirds, depending on the color set, with $S-(L+M)$ remaining the main predictor. $L-M$ also was a significant predictor for trichromat males, but only for lighter colors. Hurlbert and Ling (19) also found that $L-M$ contributed to the male preference for colors that were similar to ours in lightness (our mean L^* was ~ 80 ; Hurlbert and Ling's mean L^* was ~ 77).

As expected, the cone-contrast model could not explain dichromat color preference: Dichromats supposedly lack $L-M$ cone opponency, and $S-(L+M)$ cone contrast cannot explain high preferences both for blue and yellow hues simultaneously. However, $|S-(L+M)|$, which ignores the contrast sign but captures its intensity, accounted for almost two thirds of the variance in protanope preference. When colors varied mainly in hue, $|S-(L+M)|$ predicted more than three quarters of the variance in protanope preference. For deuteranopes, neither $|S-(L+M)|$ or $|s'|$ was a significant predictor of preference when colors varied in hue, saturation, and lightness, but $|S-(L+M)|$ was a significant predictor for deuteranope preference of saturated colors that varied mainly in hue. Surprisingly, given the lack of M cones for deuteranopes, $L-M$ significantly predicted more than half of the variance in deuteranope preference for light colors, as it did for the trichromat males in this study and in Hurlbert and Ling (19).

As in prior studies (18–20), we modeled color preference using a cone-contrast model [$S-(L+M)$; $L-M$] developed from psychophysical experiments (i.e., threshold detection; see ref. 23). Some have argued that this kind of model does not fully account for hue perception (*SI Text*). Alternative models that combine the responses from the three cone types in a different way (e.g., a multistage model described in ref. 24, in which there is an

Table 2. Correlation coefficients (r) between preference and naming response time, naming-error rate, naming consistency, and consensus

Group	Response time	Naming-error rate	Consistency	Consensus
Male	−0.68**	−0.44**	0.35*	0.44**
Female	−0.20	−0.20	0.30	0.20
Protanope	−0.74**	−0.36*	0.51**	0.54**
Deuteranope	−0.68**	−0.44**	0.50**	0.51**

$n = 35$ stimuli; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ (one-tailed).

important contribution of S-cone signals for both red–green and yellow–blue axes) have been shown to be more consistent with perceptual experience (26). When we repeated analyses using the multistage model, we found that the two kinds of model equally accounted for the color preference of normal trichromats (*SI Text*).

Dichromats named colors differently than trichromats about one third of the time. As previously found (11), there were significantly more naming errors by protanopes than by deuteranopes. The difference probably is related to (*i*) the greater alteration of the achromatic mechanism in protanopes than in deuteranopes (see, for example, the luminous efficiency curves in figure 4 in ref. 14) and (*ii*) the greater importance of the achromatic mechanism in dichromat than in trichromat naming (see figure 3 in ref. 11). When color preferences were analyzed according to naming, dichromats preferred colors named as yellow more than trichromats, and protanopes preferred blues less than trichromats. Colors that were named more quickly and with less error, consistently, and according to group consensus were most preferred for all groups except females. In addition, dichromats preferred colors that they named the same as trichromats more than colors that they named differently from trichromats.

Combined, the findings have implications for our understanding of (*i*) how red–green dichromacy affects color perception; (*ii*) the mechanisms of color preference; and (*iii*) general principles of aesthetics and perception. We discuss each in turn.

First, the findings suggest that dichromacy affects color perception more in protanopes than in deuteranopes. For both naming and preference, the similarity between dichromats and trichromats was less for protanopes than for deuteranopes. This result supports prior research, which has found that protanopes make more naming errors than deuteranopes (9, 11), and shows for the first time, to our knowledge, that this effect extends to color preference. For deuteranopes, there also was evidence of a residual red–green mechanism affecting color preference, because L–M significantly predicted deuteranope preference for light colors, as it did for male trichromats. Prior research has argued for a residual red–green mechanism influencing dichromat color naming for stimuli over 3° (8–11). Here, we show that such a mechanism is likely at play when deuteranopes decide how much they like light colors and provides evidence of residual red–green discrimination in an aesthetic aspect of color perception. Various explanations have been proposed for this residual red–green mechanism, such as rod intrusion (10), gains and nonlinearities applied to the receptor signals (7), or the influence of chromatic aberrations (12). Further research is needed to understand this mechanism and why it appears to influence deuteranope but not protanope preference.

Second, the findings have implications for color-preference models. We show that cone contrast can be amazingly effective in capturing color preference when colors vary mainly in hue (explaining almost 100% of the variance in the male preference in light colors) but is less effective for colors that vary in hue and vary strongly in saturation and lightness. Therefore, the model can provide a useful way of comparing the mechanisms of hue preference across groups even if it does not capture preference in a 3D color space. The fact that dichromat color preferences could be modeled using modified variables that consider their altered cone response provides further corroboration that hue preferences can be modeled by the underlying subsystems of color vision. The current findings also suggest that the yellow–blue mechanism is much more important for human color preference than the red–green one, perhaps explaining why the red and green preferences of dichromats with a residual red–green mechanism were so similar to those of trichromats.

Color preference has been explained in terms of the emotional response to color (22) and the valence of objects associated with colors (18). Here, we also show that the degree to which males (but not females) like a color is related to how easy it is to name the color. Response time explained up to half the variance in color preference for trichromat males and for dichromats.

Although this variance is less than that explained by the relationship between color preference and the valence of color-associated objects (80%) (18) or emotional response (67%) (22), the relationship between naming speed and preference is still substantial. Furthermore, when we used both the most relevant cone-opponent mechanism and naming response time as predictors, the explained variance increased significantly (by more than 50% for all male groups). Cone contrast and color naming do not account for all the variance in preference. Given that past research has revealed other predictors which also partially explain color preference, future research should aim at understanding the relationships between the various predictors, including those identified in the current study, and should investigate the extent to which each predictor is weighted by different groups. Some combination of predictors may provide a more complete model, although accounting for 100% of the variance in a human judgment such as preference is, of course, a challenge. Future research also should consider whether non-linear models account for more of the variance, because only linear models have been considered so far.

Third, the finding has broader implications for theories of aesthetics. Since Fechner founded the field of aesthetics research in the late 19th century, experimental research has sought to identify general principles of aesthetics (27). One contemporary theory proposes that the more fluently a stimulus can be processed, the more it is liked (28). It has been proposed that stimuli with greater contrast, clarity, symmetry, familiarity, and prototypicality are processed more fluently by an observer (29), and relationships between fluency and preference have been documented for stimuli such as music (30), faces (31), voices (32), and art (33). Prior work has found greater preference for focal than nonfocal colors (34), but an explicit link between color preference and fluency has not been demonstrated previously. Here we show that, for males, the general principle of fluency (measured by ease of naming, i.e., naming response time) at least partially accounts for color preference. Importantly, we also show that when genetic mutation (e.g., dichromacy) affects stimulus fluency, the relationship between fluency and preference holds for males. Finally, we show that there can be group differences in the extent to which fluency predicts preference, because the relationship between fluency and color preference was present only for tri- and dichromat males, but not for females. Further investigation of such group differences may clarify the conditions under which fluency contributes to preference, as opposed to alternative mechanisms such as complexity or novelty (35). More broadly, the current finding that group differences in color preference (e.g., differences between trichromats and dichromats) are accounted for by biological components of color vision resonates with the debate on the relative contributions of culture, environment, and genes to individual differences in perception (1–3).

Combined, the findings on cone contrast and color naming suggest that the more psychological specificity colors have, the more they are preferred. By “psychological specificity” we mean the extent to which colors produce the greatest response in the visual system and the extent to which they are salient, distinctive, and less prone to be confused with other colors. For example, dichromat preference peaks at colors with the strongest response in the yellow–blue mechanism and that are easiest for dichromats to name. As Palmer and Schloss (18) argue, human color preferences could be essentially adaptive, and people could be more likely to interact, survive, and reproduce successfully if they prefer some colors over others (19). Because color perception has adaptive uses related to the speed and ease of processing (e.g., when locating something useful or dangerous), it seems logical that males prefer colors that are easy to name and therefore process. The lack of such a relationship for females deserves further investigation and could reveal important differences in the underlying mechanisms of male and female color preference. The current investigation reveals the aesthetic response of dichromats to their colored world and provides greater understanding of dichromacy, why we like some colors more than others, and general theories of aesthetics.

Methods

Participants. Participants were 15 males and 17 females with normal color vision and 17 deuteranope males and 15 protanope males with dichromatic color vision. There were no significant group differences in age (mean age: trichromat males = 29.40 y, SD = 6.49; trichromat females = 28.29 y, SD = 9.73; protanopes = 34.00 y, SD = 8.60; deuteranopes = 27.82 y, SD = 8.59), $F(3,60) = 1.72$, $P = 0.17$. All participants were native Spanish speakers; 18 were students from Universidad Complutense de Madrid, but most were research volunteers from the local area. Their color vision was tested with a set of psychophysical tests (36–38). None had tritan defects. To assign them into groups, participants with color-vision deficiencies also performed a Rayleigh match in a Nagel anomaloscope (Tomey, AF-1). The research was conducted according to the principles of the Declaration of Helsinki, and all participants gave informed consent. This research was approved by the Universidad Complutense de Madrid – Hospital Clínico San Carlos review board.

Stimuli and Experimental Set-Up. The 24 stimuli (Fig. S1) were close approximations of the saturated (S), light (L), and dark (D) sets from the BCP (18). The saturated set comprised good saturated examples of red (R), orange (O), yellow (Y), chartreuse (H), green (G), cyan (C), blue (B), and purple (P). The light and dark sets were approximately halfway between those of the corresponding hue in the saturated set and Munsell Chroma 1. Munsell value (lightness) was approximately halfway between that of the corresponding hue in the saturated set and Munsell value 9 (light) or 1 (dark). We also used a set of focal stimuli that were the best exemplars of the 11 basic color categories named in Spanish (11) and included the best exemplars of red, green, yellow, blue, orange, pink, purple, brown, black, gray, and white (Fig. S1). The chromaticity coordinates for the 35 stimuli were verified with a Minolta CL-200 lux-colorimeter (Table S2). All stimuli were presented as circular patches (8°) on a calibrated 24-inch in-place switching LCD monitor with a hood in a dark room (LaCie 324i; resolution of $1,920 \times 1,200$ pixels; reference white: $Y = 18,195 \text{ cd/m}^2$, $x = 0.36$, $y = 0.35$). The center of the monitor was at participants' eye level, at a distance of 65 cm.

Design and Procedure. Participants completed a color-preference task and a color-naming task, with task order counterbalanced across participants. For the color-preference task, stimuli were presented individually in the center of a gray background ($Y = 32.35 \text{ cd/m}^2$, $x = 0.35$, $y = 0.35$). A line representing a rating scale (22° horizontal, 1° vertical) was presented below the colored circle, and participants were required to move the cursor from its neutral position in the middle of the scale to indicate their degree of preference for the stimuli. Text (12-point Arial font) below each endpoint specified what that end of the scale represented (0, *nada*, not at all; 10, *mucho*, very much). A trial began with a 500-ms fixation cross (1° diameter) and a simultaneous whistle, followed by 500 ms of gray background. The stimulus remained on the screen until the participant indicated how much they liked the color by sliding the cursor along the rating scale and clicking the confirmation button. After performing 24 practice trials, participants rated each stimulus twice in a pseudorandom order (without consecutive stimulus repetitions).

The naming task was identical, except that participants were required to name rather than rate the colors, and each stimulus remained on the screen for 2.5 s. Participants were instructed to name aloud the color using one of the 11 Spanish basic color terms: *rojo* (red), *verde* (green), *amarillo* (yellow), *azul* (blue), *naranja* (orange), *rosa* (pink), *morado* (purple), *marrón* (brown), *negro* (black), *gris* (gray), or *blanco* (white). Response time was registered as the start of the verbal response using a unidirectional condenser microphone (Fonestar FMC-616) and a digital recorder (Olympus VN-711PC) for backup purposes. The experimenter manually registered color names and verbal artifacts (i.e., dubious interjections, changes in response). Participants took an average of 12 min to complete the full experiment. For both tasks, participants were instructed to answer as quickly but precisely as possible.

ACKNOWLEDGMENTS. We thank Jenny Bosten for helpful comments on an earlier version of this manuscript. This work was funded by Universidad Complutense de Madrid Research Grant BE48/09 (to L.Á.), European Research Council Starting Grant (project "CATEGORIES") 283605 (to A.F.) and Ministerio de Economía y Competitividad Grant PSI2012-37778 (to J.L., H.M., and L.Á.).

- Sharpe LT, Stockman A, Jagle H, Nathans J (1999) Opsin genes, cone photopigments, color vision, and color blindness. *Color Vision From Genes to Perception*, eds Gegenfurtner KR, Sharpe LT (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK), pp 3–51.
- Neitz J, Neitz M (2011) The genetics of normal and defective color vision. *Vision Res* 51(7):633–651.
- Wilmer JB (2008) How to use individual differences to isolate functional organization, biology, and utility of visual functions; with illustrative proposals for stereopsis. *Spat Vis* 21(6):561–579.
- Gingras B, Honing H, Peretz J, Trainor LJ, Fisher SE (2015) Defining the biological bases of individual differences in musicality. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 370(1664): 20140092.
- Smith VC, Pokorny J (2003) Color matching and color discrimination. *The Science of Color*, ed Shevell SK (Optical Society of America, Amsterdam), 2nd Ed, pp 103–148.
- Smith VC, Pokorny J (1977) Large-field trichromacy in protanopes and deuteranopes. *J Opt Soc Am* 67(2):213–220.
- Wachtler T, Dohrmann U, Hertel R (2004) Modeling color percepts of dichromats. *Vision Res* 44(24):2843–2855.
- Scheibner HM, Boynton RM (1968) Residual red-green discrimination in dichromats. *J Opt Soc Am* 58(8):1151–1158.
- Nagy AL, Boynton RM (1979) Large-field color naming of dichromats with rods bleached. *J Opt Soc Am* 69(9):1259–1265.
- Montag ED, Boynton RM (1987) Rod influence in dichromatic surface color perception. *Vision Res* 27(12):2153–2162.
- Lillo J, Moreira H, Álvaro L, Davies I (2014) Use of basic color terms by red-green dichromats: 1. General description. *Color Res Appl* 39(4):360–371.
- Forte JD, Blessing EM, Buzás P, Martin PR (2006) Contribution of chromatic aberrations to color signals in the primate visual system. *J Vis* 6(2):97–105.
- Brookes J (2010) *What Do the Colour-Blind See? Color Ontology and Color Science*, eds Cohen JD, Matthen M (MIT Press, London), pp 291–405.
- Pridmore RW (2014) Orthogonal relations and color constancy in dichromatic color-blindness. *PLoS ONE* 9(9):e107035.
- Moreira H, Lillo J, Álvaro L, Davies I (2014) Use of basic color terms by red-green dichromats. II. Models. *Color Res Appl* 39(4):372–386.
- Brettel H, Viénot F, Mollon JD (1997) Computerized simulation of color appearance for dichromats. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 14(10):2647–2655.
- Lillo J, Álvaro L, Moreira H (2014) An experimental method for the assessment of color simulation tools. *J Vis* 14(8):15.
- Palmer SE, Schloss KB (2010) An ecological valence theory of human color preference. *Proc Natl Acad Sci USA* 107(19):8877–8882.
- Hurlbert AC, Ling Y (2007) Biological components of sex differences in color preference. *Curr Biol* 17(16):R623–R625.
- Taylor C, Franklin A (2012) The relationship between color-object associations and color preference: Further investigation of ecological valence theory. *Psychon Bull Rev* 19(2):190–197.
- Taylor C, Clifford A, Franklin A (2013) Color preferences are not universal. *J Exp Psychol Gen* 142(4):1015–1027.
- Ou L-C, Luo MR, Woodcock A, Wright A (2004) A study of colour emotion and colour preference. Part III: Colour preference modeling. *Color Res Appl* 29(5):381–389.
- Eskey RT, McLellan JS, Giulianini F (1999) Chromatic detection and discrimination. *Color Vision: From Genes to Perception*, eds Gegenfurtner KR, Sharpe LT (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK), pp 345–368.
- De Valois RL, De Valois KK (1993) A multi-stage color model. *Vision Res* 33(8):1053–1065.
- Viénot F, Brettel H, Ott L, Ben M'Barek A, Mollon JD (1995) What do colour-blind people see? *Nature* 376(6536):127–128.
- Schmidt BP, Neitz M, Neitz J (2014) Neurobiological hypothesis of color appearance and hue perception. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 31(4):A195–A207.
- Palmer SE, Schloss KB, Sammartino J (2013) Visual aesthetics and human preference. *Annu Rev Psychol* 64:77–107.
- Reber R, Schwarz N, Winkielman P (2004) Processing fluency and aesthetic pleasure: Is beauty in the perceiver's processing experience? *Pers Soc Psychol Rev* 8(4):364–382.
- Reber R (2012) Processing fluency, aesthetic pleasure, and culturally shared taste. *Aesthetic Science: Connecting Mind, Brain, and Experience*, eds Shimamura AP, Palmer SE (Oxford Univ Press, New York), pp 223–249.
- Smith JD, Melara RJ (1990) Aesthetic preference and syntactic prototypicality in music: 'Tis the gift to be simple. *Cognition* 34(3):279–298.
- Langlois JH, Roggman LA (1990) Attractive faces are only average. *Psychol Sci* 1(2): 115–121.
- Babel M, McGuire G (2015) Perceptual fluency and judgments of vocal aesthetics and stereotypicality. *Cogn Sci* 39(4):766–787.
- Halberstadt J, Hooton K (2008) The affect disruption hypothesis: The effect of analytic thought on the fluency and appeal of art. *Cogn Emotion* 22(5):964–976.
- Martindale C, Moore K (1988) Priming, prototypicality, and preference. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 14(4):661–670.
- Hekkert P, Snelders D, van Wieringen PC (2003) 'Most advanced, yet acceptable': Typicality and novelty as joint predictors of aesthetic preference in industrial design. *Br J Psychol* 94(Pt 1):111–124.
- Ishihara MD (1996) *Ishihara's Tests for Colour Deficiency* (Kanehara Trading, Tokyo).
- Fletcher R (1980) *The City University Colour Vision Test* (Keeler, London), 2nd Ed.
- Lanthony P (1985) *Album Tritan* (Luneau Optalmologie, Paris).
- Smith VC, Pokorny J (1975) Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm. *Vision Res* 15(2):161–171.

Supporting Information

Álvaro et al. 10.1073/pnas.1502104112

SI Text

SI Stimuli

The stimuli used are shown in Fig. S1.

Reliability. When individual data were correlated (rather than taking group averages), all individuals in the four groups were reliable in their preference, with significant correlations (all $P < 0.01$) between first and second rating for normal trichromats (mean r_{xx} : $r = 0.84$ for males and $r = 0.88$ for females) and dichromats (mean r_{xx} : $r = 0.77$ for protanopes and $r = 0.76$ for deuteranopes).

Similarity in Group Color-Preference Curves. To quantify the similarity of dichromats' and trichromats' color preferences across all stimuli, preference ratings of protanopes and deuteranopes were correlated with ratings of male trichromats (because the dichromats also were male). Male trichromat color preference was significantly related to both dichromat groups but was more highly related to deuteranopes ($r = 0.81$, $P < 0.001$) than to protanopes ($r = 0.46$, $P < 0.01$). Significant differences between both correlations were confirmed after Fisher's Z transformation ($Z = 2.52$, $P < 0.01$), suggesting that color preference is affected more by protanopia than by deuteranopia. Interestingly, male and female trichromat color preference ($r = 0.64$, $P < 0.001$) is less similar than male trichromat and deuteranope color preference, but the difference between both correlations was not statistically significant ($Z = 1.48$; $P = 0.07$).

Female Trichromat and Dichromat Color Preference for BCP Stimuli: Pairwise Comparisons. Bonferroni-corrected pairwise comparisons revealed that trichromat females preferred yellow less than protanopes ($P < 0.001$) and deuteranopes ($P < 0.05$); protanopes preferred cyan less than trichromat females ($P < 0.01$); deuteranopes preferred purple less than females ($P < 0.05$).

Female Trichromat Color Preference for Focal Colors Versus Dichromat or Male Color Preference for Focal Colors: Pairwise Comparisons. Focal yellow preference was significantly higher in protanopes and deuteranopes than in trichromat females; focal pink preference was significantly lower in protanopes and deuteranopes than in trichromat females; and focal black preference was significantly higher in deuteranopes than in trichromat females. Normal male and female trichromats differed only in their preference for green: focal green preference was significantly higher in males than females (all $P < 0.05$).

Colorimetric Computations: Cone Contrast. The L–M and S–(L+M) cone-opponent color contrasts between stimulus and background were calculated using the procedure described by Hurlbert and Ling (19). Beginning with x , y , Y [International Commission on Illumination (CIE) 1931] values and the Smith and Pokorny (39) cone fundamentals, the L, M, and S cone excitations were calculated. Cone-contrast values (ΔL , ΔM , and ΔS) were calculated as $\Delta L = (L_s - L_b)/L_b$; $\Delta M = (M_s - M_b)/M_b$; and $\Delta S = (S_s - S_b)/S_b$, where the subscript “s” represents the stimulus, and the subscript “b” represents the background color. Following Eskew et al. (23), the L–M cone contrast is equal to $LM_c = 0.7 \cdot \Delta L - 0.72 \Delta M + 0.02 \Delta S$, and the S–(L+M) cone contrast is equal to $S_c = 0.8 \Delta S - 0.55 \Delta L - 0.25 \Delta M$.

Colorimetric Computations: Multistage Model. To account for some perceptual phenomena unexplained by the standard two-stage

model [L–M and S–(L+M)], De Valois and De Valois (24) proposed an alternative multistage color-vision model that incorporates the rotation of the standard chromatic axes. To investigate whether this multistage model can account for color preference to a greater extent than the standard model, the RG and YB systems were modeled using the following procedure. First, beginning with x , y , Y (CIE 1931) values and the Smith and Pokorny (39) cone fundamentals, the L, M, and S cone excitations (relative to the background color) were calculated. Second, RG and YB perceptual opponency was calculated using the computations given in table 1 in ref. 24. They suggested two possibilities that differ in the nature of the inputs to the surrounds of the midget and bipolar ganglion cells: indiscriminate surrounds (inputs coming from L, M, and S cones) or cone-specific (discrete) surrounds (L-cone center cells receive an antagonistic input only from M cones, and vice versa). In the indiscriminate version, the red–green system is equal to $RG = 90 \cdot L - 115 \cdot M + 25 \cdot S$ and the yellow–blue system is equal to $YB = -130 \cdot L + 95 \cdot M + 35 \cdot S$; In the discrete version, $RG = 90 \cdot L - 115 \cdot M + 30 \cdot S$ and $YB = -130 \cdot L + 95 \cdot M + 30 \cdot S$. Fig. S2 compares the L–M and S–(L+M) values (23) of the saturated, light, and dark sets of colors and the corresponding RG and YB values (24).

Regression on Color Preference: Multistage Model. The indiscriminate multistage color model significantly accounted for less than half of the variance in the average pattern of color preference for trichromat males [39.3%, $F(2,21) = 6.79$, $P < 0.01$] and females [46.2%, $F(2,21) = 9.02$, $P < 0.01$] but accounted for less variance and was not statistically significant for protanopes [5.3%, $F(2,21) = 0.59$, $P = 0.57$] and deuteranopes [11.6%, $F(2,21) = 1.37$, $P = 0.28$]. The YB system was the only significant predictor for trichromat males [$t = 3.68$, $P < 0.01$; the univariate linear regression model accounted for 39.1% of the variance, $F(1,22) = 14.11$, $P < 0.01$] and females [$t = 4.06$, $P < 0.01$; 38.3%, $F(1,22) = 13.63$, $P < 0.01$], but RG was not a significant predictor for any group (all $P > 0.05$). The results of the discrete multistage color model were similar to those of the indiscriminate model for all four groups: trichromat males [41.0%, $F(2,21) = 7.29$, $P < 0.01$], females [45.9%, $F(2,21) = 8.91$, $P < 0.01$], protanopes [5.3%, $F(2,21) = 0.58$, $P = 0.57$], and deuteranopes [12.3%, $F(2,21) = 1.48$, $P = 0.25$]. The YB system was the only significant predictor for trichromat males [$t = 3.82$, $P < 0.01$; the univariate linear regression model accounted for 40.9% of the variance, $F(1,22) = 15.20$, $P < 0.01$] and females [$t = 3.85$, $P < 0.01$; 36.5%, $F(1,22) = 12.62$, $P < 0.01$], but RG was not a significant predictor for any group (all $P > 0.05$).

Colorimetric Computations: L^*_T . Two L^*_T values were calculated for each stimulus, bearing in mind protanopes' lack of functionality in L cones and deuteranopes' lack of functionality in M cones. The procedure was similar to that of Moreira et al. (15). For each stimulus L and M cone responses were estimated from x , y , Y (CIE 1931) values and the Smith and Pokorny (39) cone fundamentals. The relative contribution of L and M cones to luminosity (2:1) was used to compute a specific transformed luminance for protanopes (Y_p) and deuteranopes (Y_d), assuming that the luminance of the reference white is exactly the same both for normal trichromats and dichromats, so that it is possible to compute one scaling factor for protanopes and another for deuteranopes. Finally, we computed the corresponding (L^*_T) values for both types of dichromats.

Colorimetric Computations: s' . Two s' values were computed for each stimulus following a procedure analogous to that of Moreira et al. (15). Transformed saturation identifies hue and quantifies saturation using the confusion lines in the chromaticity diagram. A confusion line includes all the pseudoisochromatic stimuli for a dichromat type. All confusion lines radiate from a dichromatic confusion point (protanope: $x = 0.75, y = 0.25$; deuteranope: $x = 1.4, y = -0.40$). Every confusion line has a specific s' value. This value is zero for the line that includes the achromatic point ($x = 0.36, y = 0.35$), because that line goes through all the stimuli that dichromats must perceive as achromatic. To compute s' for the rest of the confusion lines, each line defines an intersection point with the yellow line ($\lambda_d = 575$ nm) or with the blue line ($\lambda_d = 475$ nm). The variable s' is the distance between the achromatic point and the intersection point. This distance coincides (except for a scalar) with the value of s_{uv} for the intersection point. To identify hue, s' is positive for intersection points located on the yellow line and negative for those located on the blue line.

Regression on Color Preference: Lightness and Saturation as Predictors.

For lightness, regressions were conducted for the four groups with standard lightness [L^* : male 14.7%, $F(1,22) = 3.80$; female 1.6%, $F(1,22) = 0.36$; protanopia 6.9%, $F(1,22) = 1.63$; deuteranopia 0.1%, $F(1,22) = 0.03$] and for both dichromat groups with transformed lightness [L^*_T : protanopia 5.7%, $F(1,22) = 1.34$; deuteranopia 0.4%, $F(1,22) = 0.76$] as predictors, but none was significant (all $P > 0.05$). For saturation, regressions were conducted on the average preference ratings for the four groups with standard saturation (s_{uv}) as predictor [male 14.7%, $F(1,22) = 3.81$; female 15.9%, $F(1,22) = 4.17$; protanopia 0.2%, $F(1,22) = 0.45$; deuteranopia 2.6%, $F(1,22) = 0.58$], but none were significant (all $P > 0.05$).

Relationship of Color Preference and Color Naming: Pairwise Comparisons Between Female Trichromats and Dichromats or Male Trichromats. Dunnett's C-corrected comparisons revealed that protanopes prefer colors named as brown or black significantly more than females do ($P < 0.05$); deuteranopes prefer colors named as black significantly more than females do ($P < 0.05$); females prefer

colors named as pink significantly more than males and deuteranopes do ($P < 0.05$) but not more than protanopes ($P > 0.05$).

Error-Naming Rate. As expected, the error-naming rate (Table S1) was significantly lower ($P < 0.001$) for focal colors than for the BCP stimuli both for protanopes (15.76 and 49.86%, $t = -9.70$) and deuteranopes (12.83 and 34.31%, $t = -7.08$).

SI Relationship of Color Preference and Color-Naming Response Time. The relationship between color preference and color-naming response time is shown in Fig. S3.

Relationship of Color Preference and Color-Naming Categories. An analysis also was conducted to establish whether, when dichromats made consistent errors in naming (e.g., a saturated purple stimulus identified twice as blue), dichromat preference was more similar to trichromat preference for the same stimulus ($|\Delta_s|$, i.e., mean preference of all trichromat males for saturated purple) or for stimuli that share the incorrect color name ($|\Delta_n|$, mean preference of all trichromat males for stimuli which were most frequently named blue). Paired t tests revealed that, when consistent errors are considered, the similarity between deuteranopes and trichromats was greater if the actual stimulus was the same than if the given color name was the same (mean $|\Delta_s| = 1.43$, mean $|\Delta_n| = 1.71$, $t = -2.13$, $P < 0.05$). The same tendency was present for protanopes (mean $|\Delta_s| = 1.83$, mean $|\Delta_n| = 1.96$), but the difference was not significant ($t = -1.08$, $P > 0.05$).

When deuteranopes made errors in color naming (e.g., a deuteranope called dark yellow "green"), their preference was significantly more similar to that of male trichromats' preference for the same actual stimulus (dark yellow) than for other colors that male trichromats named the same as the dichromats (greens). This finding suggests that the categories of common observers do not predict how much dichromats like specific colors.

SI Chromatic Coordinates and Luminance for the Full Set of Colors. Chromatic coordinates and luminance for the full set of colors are shown in Table S2.

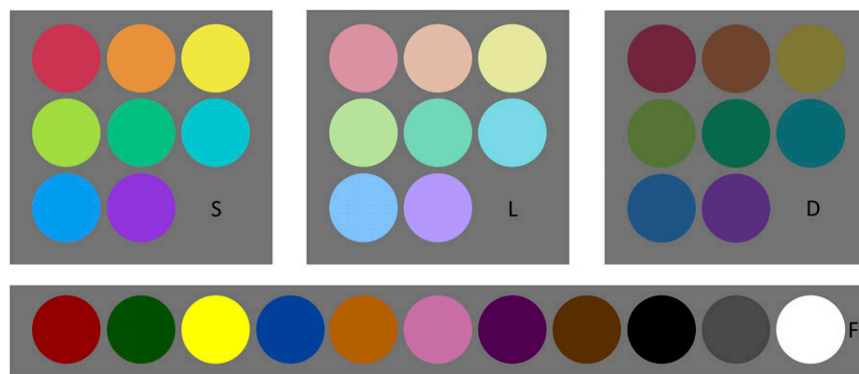


Fig. S1. Thirty-five stimuli from the saturated (S), light (L), dark (D), and focal (F) sets presented against the background used in the experiment. Colors are only an approximation of those in the experiment because of reproduction inaccuracies.

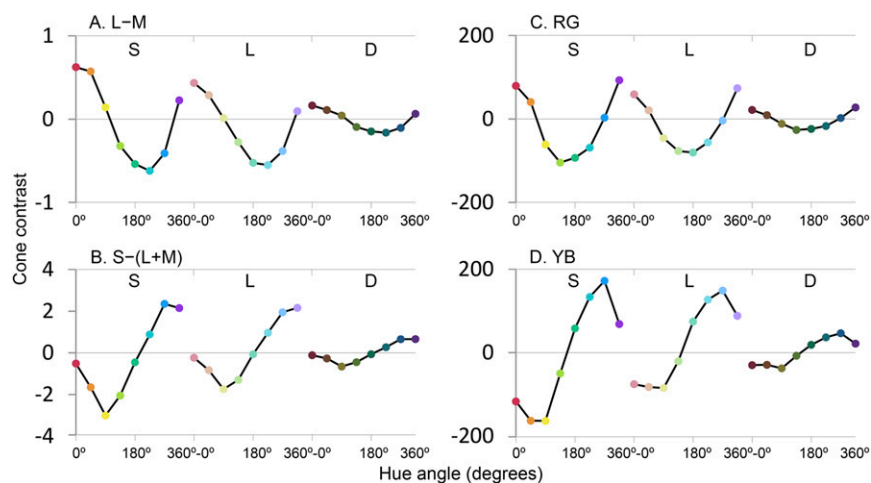


Fig. S2. Stimulus-background cone contrast and RG, YB values for saturated (S), light (L), and dark (D) colors computed using the two-stage model L-M (A) and S-(L+M) (B) or the indiscriminate version of the multistage model RG (C) and YB (D).

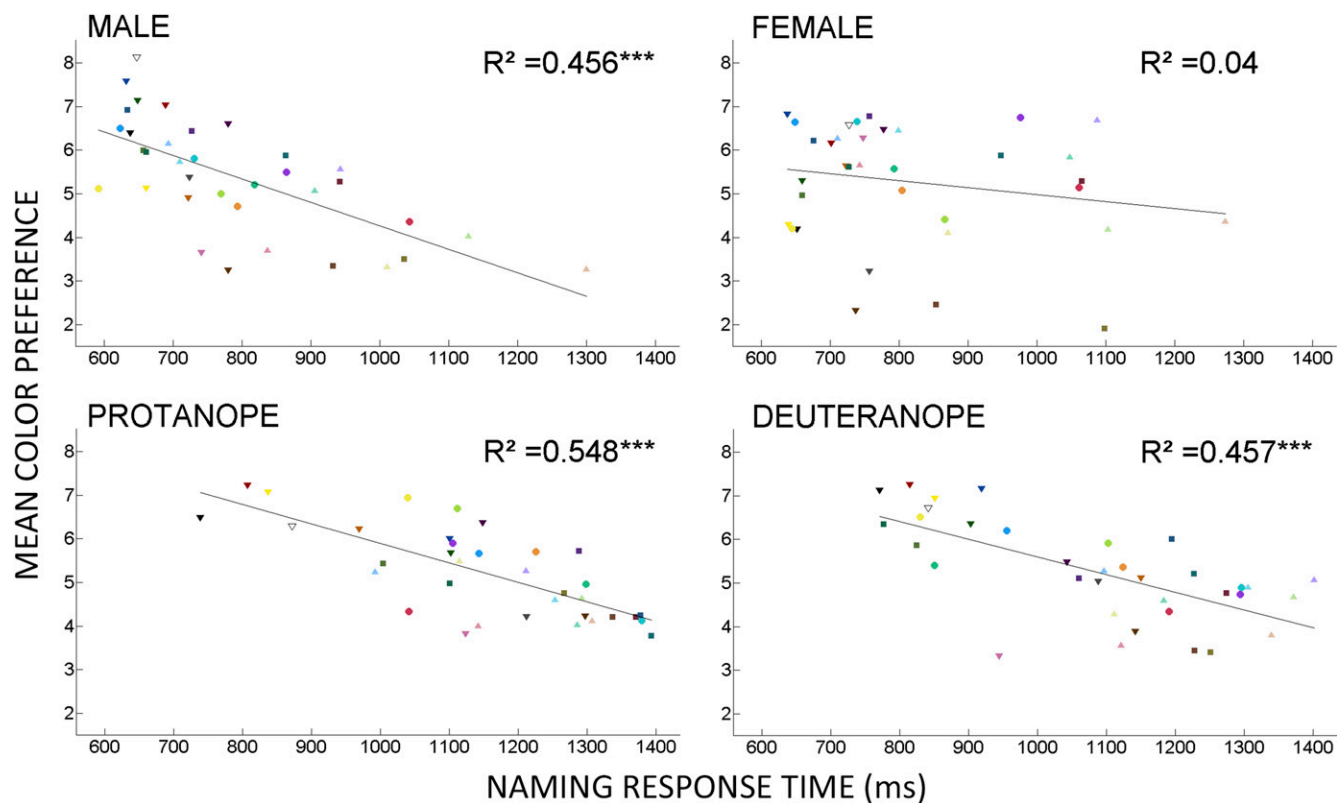


Fig. S3. Color-preference ratings (y axis) plotted against the naming response time (RT) (x axis) for 35 colors from the focal (inverted triangles), saturated (circles), light (triangles), and dark (squares) sets, averaged for trichromatic males and females, dichromatic protanopes, and deuteranopes. R^2 and the best-fitting lines are given also. Marker colors are only an approximation of those in the experiment. *** $P < 0.001$.

